

UNIVERSIDADE DE LISBOA  
FACULDADE DE CIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOGRÁFICA, GEOFÍSICA E ENERGIA



## **Otimização Energética do Edifício C8 FCUL**

André Ricardo Fialho Caldeira

**Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente**

Dissertação orientada por:  
Professor Doutor Guilherme Carrilho da Graça

2016

*“Skills are cheap. Passion is priceless.”*  
– Gary Vaynerchuk

## Agradecimentos

Em primeiro lugar quero agradecer aos meus pais, por terem depositado em mim a sua confiança e por todos os valores que me transmitiram. Fizaram de mim uma pessoa melhor e agradeço-vos por todo o esforço ao longo destes anos.

Ao meu irmão por me incentivar nos meus objetivos e por estar sempre presente nos bons e nos maus momentos da minha vida.

À minha tia Matilde e aos meus Avós por se orgulharem de mim e acreditarem nas minhas capacidades enquanto homem e estudante.

À Mónica, por ter feito a diferença. Por todo o amor e pelas palavras de apoio que me ajudaram a motivar e ultrapassar as etapas mais difíceis do meu percurso académico.

A todos os meus amigos pelos momentos de descontração e por toda a amizade. São a família que escolhi e ajudaram-me a crescer como pessoa. Tiveram um papel fundamental na minha formação a todos os níveis.

Ao José Fernandes e a toda a equipa dos serviços técnicos da faculdade pela disponibilidade, pelas informações fornecidas e por toda a ajuda nos trabalhos mais técnicos.

Ao Professor Guilherme Carrilho da Graça por me ter acolhido de bom grado e por todo o conhecimento transmitido. Tudo o que aprendi será fundamental no meu futuro profissional.

Ao Dr. Nuno Mateus por me ter auxiliado ao longo de todo este trabalho. Por toda a ajuda, disponibilidade e incentivo, contribuíste em muito para o sucesso deste projeto.

Por fim queria agradecer a todos os meus colegas do grupo de edifícios (Filipa, Daniel, Gonçalo, Francisco, João Francisco, Cristiano e Nuno) pelo bom ambiente, companheirismo e entreajuda durante os meses passei com vocês.

## Resumo

A exigência dos níveis de conforto térmico e da própria qualidade do ar no interior em edifícios tem aumentado bastante nos últimos anos. Como consequência, a energia consumida por sistemas de climatização representa aproximadamente metade de toda a energia faturada em edifícios. Nos edifícios de serviços há especialmente um desinteresse pela poupança de energia, com impactos substanciais na fatura energética e no ambiente. A eficiência energética surge como um meio importante para mitigar os prejuízos económicos e ambientais provocados pela grande quantidade de energia solicitada pelos sistemas climatização.

O presente trabalho consiste no estudo de duas medidas de eficiência energética e os seus impactos no conforto térmico, qualidade do ar interior e consumo de energia final. Será feita uma comparação entre o funcionamento atual do sistema de aquecimento, arrefecimento e ar condicionado (AVAC) e após a aplicação das medidas de racionalização do consumo de energia (MRCE), com o auxílio de um *software* de simulação dinâmica computacional, o *EnergyPlus*.

Os resultados obtidos neste trabalho mostram que a ventilação natural é uma forma viável de promover o conforto térmico dos ocupantes e a qualidade do ar interior, possibilitando uma redução bastante significativa do consumo de energia elétrica para climatização. As MRCE representam um investimento total de 18250 euros e um retorno de mais de 16500 euros por ano. O payback esperado é de 1,1 anos, que representa um período de retorno do investimento curto e viabiliza economicamente o projeto de implementação das medidas de eficiência energética.

**Palavras-Chave:** conforto térmico, qualidade do ar, eficiência energética, consumo de energia, AVAC, simulação dinâmica, *EnergyPlus*.

## Abstract

The requirement of thermal comfort levels and the interior air quality in buildings has increased greatly in recent years. As a consequence, the energy consumed by heating, cooling and air conditioning systems (HVAC) represents approximately half of all energy consumed in buildings. People in service buildings have shown especially disinterested by energy saving, which causes an increase of the energy consumption, with impacts on the environment. In this context, energy efficiency appears as an important concept to minimize the economic and environmental damages caused by the large amount of energy requested by climatization systems.

The present work consists of a study of two measures of energy efficiency and its impacts on thermal comfort, air quality and final energy consumption. It will comprehend a comparison between the actual and forward operation of HVAC system by the application of the energy efficiency measures, with the help of a computational dynamical simulation software, *EnergyPlus*.

The results obtained in this work showed that the natural ventilation is a viable way to promote the thermal comfort of the occupants and the interior air quality, allowing a significant reduction of the electric energy consumption for the air conditioning. The application of the energy efficiency measures represents an investment of 18250€ and a return of more than 16500€ per year. This project expects a payback of 1.1 years, which represents a short period of return investment and it means that the implement of energy efficiency measures are economically feasible.

**Keywords:** thermal comfort, air quality, energy efficiency, power consumption, HVAC, dynamic simulation, *EnergyPlus*.

# Índice

Agradecimentos.....	iii
Resumo.....	iv
Abstract .....	v
Índice de Figuras .....	viii
Índice de Tabelas.....	x
Lista de Siglas .....	xii
Capítulo 1 – Introdução.....	1
1.1. Enquadramento.....	1
1.2. Objetivo.....	2
1.3. Estrutura .....	2
Capítulo 2 – Fundamentos Teóricos.....	3
2.1. Modelação de transferência de energia em Edifícios .....	3
2.2. Simulação Dinâmica Computacional .....	3
2.3. Transferência de calor .....	5
2.3.1. Condução.....	5
2.3.2. Convecção .....	6
2.3.3. Radiação.....	6
2.4. Caracterização do comportamento térmico de edifícios .....	7
2.4.1. Soluções construtivas .....	9
2.5. Conforto Térmico.....	10
Capítulo 3 – Sistema de Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado (AVAC).....	11
3.1. Mercado/Estado da Arte.....	11
3.2. Unidade de Tratamento de Ar (UTA) .....	12
3.2.1. Elementos de aquecimentos/arrefecimento .....	12
3.2.2. Ventilador.....	13
3.3.3. Filtros .....	14
3.3.4. Isoladores de vibrações .....	14
Capítulo 4 – Ventilação.....	15
4.1. Ventilação Natural.....	15
4.1.1. Estratégias de ventilação natural e influência da rugosidade do terreno .....	16
4.2. Ventilação Mecânica .....	17
4.3. Ventilação Híbrida .....	17
Capítulo 5 – Caso de Estudo .....	18
5.1. Descrição do edifício.....	18
5.2. Soluções construtivas .....	20
5.2.1. Paredes exteriores.....	21
5.2.2. Paredes interiores .....	22

Pavimento e Cobertura .....	23
5.2.3. Vãos Envidraçados .....	23
5.2.4. Sombreamento.....	25
5.3. Sistemas de climatização.....	25
5.3.1. Descrição dos sistemas.....	26
5.3.2. Sistemas de climatização por divisões .....	30
Capítulo 6 – Análise do funcionamento do sistema de AVAC .....	32
6.1. Medições .....	32
6.2. Medidas de eficiência energética e poupança esperada .....	35
Capítulo 7 – Implementação das medidas de eficiência energética .....	39
7.1. Metodologia – Simulação Dinâmica Computacional.....	39
7.1.1. Considerações da simulação dinâmica computacional.....	41
Capítulo 8 – Resultados .....	47
8.1. Sala de aula pequena .....	47
8.2. Sala de aula grande.....	51
8.3. Escritório .....	55
8.4. Gabinete .....	59
8.5. Compilação de resultados.....	63
8.6. Análise Económica.....	65
8.6.1. Poupança obtida por redução da fatura energética .....	65
8.6.2. Custos de implementação das medidas de eficiência energética.....	67
8.6.3. Período de retorno Simples do investimento.....	69
Referências Bibliográficas .....	70
Anexos.....	75
Anexo I – Propriedades do vidro.....	75
Anexo II – Fatura da eletricidade da FCUL (Outubro 2015) .....	76
Anexo III – Propriedades das luminárias .....	77
Anexo IV – Orçamento mudança de eixo de janela (basculante) e com kit oscilobatente.....	78
Anexo V – Orçamento janela basculante com vidro simples.....	79
Anexo VI – Orçamento janela com vidro duplo .....	80

## Índice de Figuras

Figura 1.1 - Consumo médio de energia final por setor na EU-28 durante o ano de 2014. Adaptado de: (European Commission, 2013).....	1
Figura 2.1 - Fases do processo de simulação dinâmica computacional em EnergyPlus. Fonte: (N. M. Mateus, 2014).....	4
Figura 2.2 - Mecanismos de transferência de calor. Fonte: (Almeida, 2015) .....	5
Figura 2.3 – Componentes do balanço térmico num edifício. Fonte: (Fonseca, 2015).....	7
Figura 2.4 - Transferência de calor entre dois corpos em contacto. Fonte: (AIGK, 2011) .....	9
Figura 3.1 - Distribuição do mercado mundial de ar condicionado em termos de valor. Adaptado de: (Intelligence, 2007) .....	11
Figura 3.2 – Diagrama da pressão vs entalpia ilustrativo do ciclo de refrigeração. Adaptado de: (Refrigeration, s.d.) .....	12
Figura 4.1 – Estratégias de ventilação natural. Fonte: (AutoDesk Sustainability Workshop, 2015) .....	16
Figura 4.2 – Dependência da velocidade do vento em altura com a rugosidade do terreno. Fonte: (AutoDesk Sustainability Workshop, 2015) .....	17
Figura 5.1: Fachada este do edifício C8 FCUL (esquerda) e cobertura do edifício com identificação do bloco climatizado por cada UTA (direita).....	18
Figura 5.2: Ocupação da área útil de pavimento. ....	19
Figura 5.3 – Exemplo típico de uma sala de aula pequena e tipo de sombreamento utilizado .....	19
Figura 5.4 – Exemplo típico de uma sala de aula grande e tipo de sombreamento utilizado.....	20
Figura 5.5 – Em cima o exemplo de um gabinete típico, em baixo um escritório comum do edifício C8. ....	20
Figura 5.6 – Constituição das paredes exteriores do edifício C8 FCUL .....	21
Figura 5.7 – Constituição das paredes interiores do edifício C8 FCUL.....	22
Figura 5.8 – Constituição do pavimento do edifício C8 FCUL. ....	23
Figura 5.9 – Exemplo de vidro simples (esquerda) e de vidro duplo (direita). As janelas de vidro simples não apresentam aberturas enquanto as janelas de vidro duplo têm uma abertura com eixo vertical.....	24
Figura 5.10 - Unidades de ar principal (UAP's) A, B, C e D.....	27
Figura 5.11 – Radiador típico do edifício C8 FCUL.....	28
Figura 5.12 - Chiller's da UTA Norte (esquerda) e da UTA Sul (direita) .....	29
Figura 5.13 – Bombas de calor na zona técnica norte do edifício C8. ....	29
Figura 6.1 – Anemómetro de molinete. Foi ainda aplicado um funil por forma a cobrir toda a área da conduta. VelociCalc® Air Velocity Meter Model 5725. Fonte: (VELOCICALC®, Operation and Service Manual: VELOCICALC® AIR VELOCITY METER MODEL 5725, 2016).....	32
Figura 6.2 – Anemómetro de fio quente. VelociCalc® Multi-Function Ventilation Meter 9565. Fonte: (VELOCICALC®, Operation and Service Manual: VELOCICALC® MULTI-FUNCTION VENTILATION METER MODEL 9565 , 2016) .....	34
Figura 6.3 – Furos efectuados para mediação dos caudais de ar à saída dos ventiladores das UTA's A, B, C e D.....	34
Figura 6.4 – Janela com abertura com eixo vertical (esquerda) e Janela com abertura basculante (direita). Adaptado de: (Catálogo de Arquitetura, 2016) .....	35
Figura 6.5 - Número de salas intervencionados para cada bloco do edifício. ....	36
Figura 6.6 – Potencial de poupança total para cada UTA do edifício.....	37
Figura 7.1 – Modelos geométricos dos quatro espaços estudados. 1 – Sala de aula pequena; 2 - sala de aula grande; 3 – Escritório; 4 – Gabinete. ....	39
Figura 7.2 - Exemplo de zonas convexas e não convexas.....	42



Figura 7.3 - Ocupação média dos locais de trabalho (Jie Zhao, 2014). .....	43
Figura 7.4 - Ocupação média das salas de aula [69]. .....	44
Figura 8.1 - Temperatura interior (esquerda), concentração de CO <sub>2</sub> (direita) para um dia frio e para um dia quente. ....	47
Figura 8.2 - Temperatura interior (esquerda), concentração de CO <sub>2</sub> (direita) para uma semana fria e para uma semana quente. ....	48
Figura 8.3 - Temperatura interior (esquerda), concentração de CO <sub>2</sub> (direita) para um dia frio e para um dia quente. ....	49
Figura 8.4 - Temperatura interior (esquerda) e concentração de CO <sub>2</sub> (direita) para uma semana fria e para uma semana quente. ....	49
Figura 8.5 - Temperatura interior (esquerda) e concentração de CO <sub>2</sub> (direita) das horas ocupadas. Os valores encontram-se em percentagem de frequência das horas ocupadas que correspondem a cada nível de temperatura/concentração CO <sub>2</sub> . ....	50
Figura 8.6 - Temperatura interior (esquerda), concentração de CO <sub>2</sub> (direita) para um dia frio e para um dia quente. ....	51
Figura 8.7 - Temperatura interior (esquerda), concentração de CO <sub>2</sub> (direita) para uma semana fria e para uma semana quente. ....	52
Figura 8.8 - Temperatura interior (esquerda), concentração de CO <sub>2</sub> (direita) para um dia frio e para um dia quente. ....	53
Figura 8.9 - Temperatura interior (esquerda), concentração de CO <sub>2</sub> (direita) para uma semana fria e para uma semana quente. ....	53
Figura 8.10 - Temperatura interior (esquerda) e concentração de CO <sub>2</sub> (direita) das horas ocupadas. Os valores encontram-se em percentagem de frequência das horas ocupadas que correspondem a cada nível de temperatura/concentração CO <sub>2</sub> . ....	54
Figura 8.11 - Temperatura interior (esquerda), concentração de CO <sub>2</sub> (direita) para um dia frio e para um dia quente. ....	55
Figura 8.12 - Temperatura interior (esquerda), concentração de CO <sub>2</sub> (direita) para uma semana fria e para uma semana quente. ....	56
Figura 8.13 - Temperatura interior (esquerda), concentração de CO <sub>2</sub> (direita) para um dia frio e para um dia quente. ....	57
Figura 8.14 - Temperatura interior (esquerda), concentração de CO <sub>2</sub> (direita) para uma semana fria e para uma semana quente. ....	57
Figura 8.15 - Temperatura interior (esquerda) e concentração de CO <sub>2</sub> (direita) das horas ocupadas. Os valores encontram-se em percentagem de frequência das horas ocupadas que correspondem a cada nível de temperatura/concentração CO <sub>2</sub> . ....	58
Figura 8.16 - Temperatura interior (esquerda), concentração de CO <sub>2</sub> (direita) para um dia frio e para um dia quente. ....	59
Figura 8.17 - Temperatura interior (esquerda), concentração de CO <sub>2</sub> (direita) para uma semana fria e para uma semana quente. ....	60
Figura 8.18 - Temperatura interior (esquerda), concentração de CO <sub>2</sub> (direita) para um dia frio e para um dia quente. ....	61
Figura 8.19 - Temperatura interior (esquerda), concentração de CO <sub>2</sub> (direita) para uma semana fria e para uma semana quente. ....	61
Figura 8.20 - Temperatura interior (esquerda) e concentração de CO <sub>2</sub> (direita) das horas ocupadas. Os valores encontram-se em percentagem de frequência das horas ocupadas que correspondem a cada nível de temperatura/concentração CO <sub>2</sub> . ....	62
Figura 8.21 - Número de salas intervencionadas em cada bloco do edifício. ....	66

## Índice de Tabelas

Tabela 5.1 - Características dos materiais de construção da parede exterior (PROTOLAB, 2014) (C. A. P. Santos, 2006).....	21
Tabela 5.2 - Características dos materiais de construção da parede interior (PROTOLAB, 2014) (C. A. P. Santos, 2006).....	22
Tabela 5.3 - Características dos materiais de construção do pavimento e cobertura (PROTOLAB, 2014) (C. A. P. Santos, 2006) .....	23
Tabela 5.4 - Características dos materiais de construção dos vãos envidraçados (PROTOLAB, 2014) (C. A. P. Santos, 2006).....	24
Tabela 5.5 - Características da ‘Blind’ de sombreamento (N. M. Mateus, 2014).....	25
Tabela 6.1: Caudais medidos com anemómetro de funil e respetivos desvios em relação ao caudais de projeto e aos requisitos mínimos do RECS. ....	33
Tabela 6.2 – Desvio entre o caudal de insuflação registado e o caudal de insuflação de projeto. ...	35
Tabela 6.3 - Intervenções para cada bloco do edifício. ....	37
Tabela 6.4 – Custo da eletricidade para funcionamento dos ventiladores e poupança esperada.....	38
Tabela 7.1 – Condições de fronteira.....	41
Tabela 7.2 – Dados introduzidos no comando “Site: WeatherStation”, (ENERGYPLUS™, 2013) (ASHRAE, 2005) .....	43
Tabela 7.3 – Dados introduzidos no comando “Site:WeatherStation” [35].....	43
Tabela 7.4 – Propriedades da iluminação inseridas no EnergyPlus .....	44
Tabela 8.1 - Frequência do intervalo de valores de temperatura interior em cada um dos espaços. 63	
Tabela 8.2 - Frequência do intervalo de valores de concentração de CO <sub>2</sub> de cada um dos espaços. 64	
Tabela 8.3 – Poupança elétrica e económica obtida para cada sala-tipo.....	65
Tabela 8.4 – Poupança económica alcançada pelas medidas de eficiência energética discretizada para cada bloco do edifício e por tipo de sala. ....	66
Tabela 8.5 – Poupança global alcançada por implementação das medidas de eficiência energética 67	
Tabela 8.6 – Custo de mudança de eixo e de instalação das janelas .....	67
Tabela 8.7 – Características dos ventiladores e custo de variadores de velocidade associados.....	68
Tabela 8.8 – Custo de investimento para aplicação das Medidas de Racionalização de Consumo de Energia (MRCE) .....	68



## Lista de Siglas

AA – Arrefecedor de Água ou Bomba de Calor

AARV – Arrefecedor de Água Reversível ou Chiller

AC – Ar Condicionado

AQS - Águas Quentes Sanitárias

AVAC - Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado

BLAST - *Building Loads Analysis and System Thermodynamics*

COP – *Coefficient of Performance*

CV – Convectores

CVA – Ventiloconvectores

DOE – *Department of Energy*

DQB - Departamento de Química e Bioquímica

EPW - *EnergyPlusWeather*

FCUL - Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa

IDF - *Input Data File*

MRCE - Medida de Racionalização de Consumo de Energia

PRS – Período de Retorno Simples

RECS – Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços

RPH – Renovações por Hora

RTU – Roof Top Units

UAP - Unidade de Ar Principai

UTA - Unidade de Tratamento de Ar

UTAN - Unidade de Tratamento de Ar Novo

VAC - Volume de Ar Constante

VAV - Volume de Ar Variável

VE – Ventilador

VN - Ventilação Natural

VRF - Volume de Refrigerante Variável

VV - variadores de velocidade

## Capítulo 1 – Introdução

### 1.1. Enquadramento

Face às constantes subidas dos preços da energia, nomeadamente do petróleo, e a ameaça constante da dependência energética começam a surgir os primeiros sinais de mudança a nível global. Há muito tempo que é conhecida a escassez das reservas de petróleo bem como os seus efeitos prejudiciais para o ambiente tornando imperativo uma mudança do paradigma mundial.

Nesse sentido/contexto, a mudança poderá passar por três iniciativas gerais que permitem melhorar o desempenho energético, sendo elas: redução do consumo final por aumento da eficiência energética, dar preferência a fontes de energia renováveis e as mudanças nos padrões de consumo de energia. Com a aquisição e utilização adequada de equipamentos mais eficientes é possível alcançar poupanças significativas de energia e aumentando a produtividade das atividades dependentes de energia, com vantagens do ponto de vista económico e ambiental (Ma, 2012).

Em 2014, o setor residencial foi responsável por 25% do consumo europeu de energia final e o setor dos serviços por 13% (European Commission, 2013). Se juntarmos o contributo de ambos, concluímos que cerca de 40% do consumo de energia final tem origem em edifícios (Ahmed Abdeen Saleem, 2016). Como resultado, os edifícios são responsáveis por 33% das emissões globais de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) (Mahmoud, 2011). Os edifícios são ainda considerados o setor mais promissor em termos de poupança energética (Ales Podgornik, 2016).

Nas cidades, as pessoas passam a maior parte do tempo em edifícios, cerca de 90%, sendo por isso um dos sectores com maior margem de redução do consumo de energia aliada a uma exigência cada vez maior em melhorar as condições dos mesmos (Prashant Kumar, 2016).

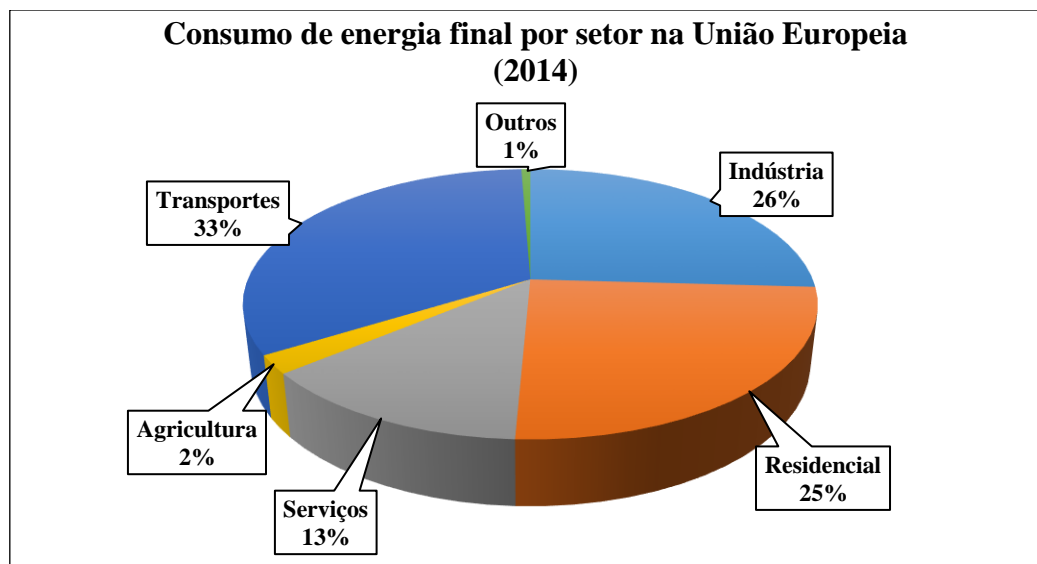


Figura 1.1 - Consumo médio de energia final por setor na EU-28 durante o ano de 2014. Adaptado de: (European Commission, 2013)

Os edifícios de serviços, são tipicamente edifícios com elevadas taxas de ocupação, onde os equipamentos eletrónicos e iluminação estão ligados durante a maior parte do dia e por vez também de noite. São edifícios com elevadas cargas internas e têm geralmente mais necessidades de arrefecimento (Nantka, 2009) (K. Flodberg, 2012). A manutenção das temperaturas de conforto térmico é um dos principais responsáveis pelo consumo de energia em edifícios em países desenvolvidos, fazendo com que as necessidades de climatização representem cerca de metade do consumo global de energia de um

edifício e cerca de 1/5 do consumo de energia total a nível nacional (Pérez-Lombard, 2008) (G. Evola, 2006).

Neste âmbito, a realização deste trabalho tem como objetivo a redução do consumo de energia de um edifício de serviços, aplicando medidas de eficiência energética, focando num dos pontos fulcrais do consumo de energia das sociedades modernas: o consumo de energia de climatização e de renovação do ar novo de um edifício de serviços.

## **1.2. Objetivo**

Esta dissertação de mestrado tem como objetivos avaliar, otimizar e reduzir o consumo de energia do sistema de Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado (AVAC) de um edifício de serviços, mais concretamente uma instituição de ensino. Será analisado o caso prático do edifício C8 da Faculdade de Ciência da Universidade de Lisboa (FCUL) e numa fase mais avançada serão tiradas conclusões quanto a fiabilidade económico-energética das medidas de eficiência utilizadas.

Por forma a atingir os objetivos determinados serão introduzidos variadores de velocidade (VV) nos ventiladores das Unidades de Ar Principais (UAP's). Esses dispositivos conferem aos ventiladores a capacidade de se adaptar às necessidades de climatização e desta forma evitar o desperdício de energia. Será ainda promovida a ventilação natural (VN) através de uma intervenção nas janelas numa parte bastante significativa do edifício, que inclui salas de aula, gabinetes e escritórios. Desta forma, os ocupantes do edifício poderão abrir as janelas mais frequentemente sem comprometer o seu conforto.

## **1.3. Estrutura**

Esta dissertação de mestrado será escrutinada do seguinte modo:

No Capítulo 2 é feita uma introdução aos princípios teóricos gerais que se consideram importantes para a compreensão do trabalho realizado.

No Capítulo 3 e no Capítulo 4 é feita a introdução teórica a conceitos mais específicos que serão frequentemente abordados ao longo do trabalho, nomeadamente, os componentes do sistema AVAC e os mecanismos de ventilação.

No Capítulo 5 é interpretado o caso de estudo prático onde será feita a descrição do edifício e as características principais do mesmo e do seu sistema de climatização.

No Capítulo 6 encontram-se os resultados das tarefas e observações desenvolvidas no âmbito do estudo do funcionamento atual do sistema AVAC.

No Capítulo 7 são apresentadas as medidas de racionalização de consumo de energia (MRCE) e a metodologia decretada nesta dissertação onde serão demonstradas tarefas consagradas, assente numa base teórica.

Por fim, no Capítulo 8 são expostos os resultados obtidos e a análise de resultados onde serão retiradas as ilações principais.

## Capítulo 2 – Fundamentos Teóricos

Durante este capítulo serão apresentados os conceitos teóricos indispensáveis para a compreensão desta dissertação. Será feita uma abordagem aos software's de simulação computacional utilizados, conceitos básicos de transferência de calor em edifícios bem como a caracterização do comportamento térmico de edifícios e uma definição de conforto térmico.

### 2.1. Modelação de transferência de energia em Edifícios

Durante a avaliação do potencial de redução de energia consumida pelo sistema AVAC surgiu a necessidade de comprovar a validade das medidas a serem implementadas. Recorreu-se à simulação dinâmica computacional para proceder à modelação das “salas-tipo” e assim verificar se os resultados obtidos estariam de acordo com o esperado.

Chama-se simulação dinâmica computacional de edifícios a uma simulação realizada com o auxílio de um computador e de um software apropriado e tem como objetivo prever ou estimar o comportamento de um edifício em termos de energia, temperatura, entre outros. Estes parâmetros podem ser visualizados para um intervalo de tempo determinado pelo utilizador. Esta forma de antever inúmeras características de um edifício é cada vez mais uma ferramenta indispensável para evitar prejuízos previsíveis. A maioria dos regulamentos do comportamento térmico dos edifícios exige a simulação dinâmica de modo a estimar quais os consumos de energia do edifício. Os cálculos são realizados com base em princípios físicos e interações térmicas que têm em conta variáveis ambientais e as características do edifício introduzidas pelo utilizador (Magoulès, 2012).

A modelação da transferência de energia em edifícios passa por duas fases principais. Numa primeira fase procede-se à construção de um modelo geométrico do edifício, incluindo as características térmicas dos materiais que o constituem e da sua envolvente. Numa segunda fase a informação introduzida anteriormente juntamente com *inputs* que caracterizam o comportamento térmico do edifício é utilizado para obter os *outputs* pretendidos, tendo por base os algoritmos matemáticos da simulação.

### 2.2. Simulação Dinâmica Computacional

Para construção do modelo geométrico utilizou-se o *SketchUp Make 15.3.331 64-bit*. Com o auxílio desta ferramenta é possível fazer a reprodução gráfica do edifício que se pretende simular. É também neste programa que se definem as zonas térmicas que serão caracterizadas no *EnergyPlus*.

O *EnergyPlus 8.3.0* foi a ferramenta de simulação dinâmica computacional utilizada. O *EnergyPlus* é um programa informático e tem como base uma junção dos programas BLAST (*Building Loads Analysis and System Thermodynamics*) e DOE-2 (*Department of Energy*) que foram criados no final dos anos 70 e início dos anos 80 como ferramentas de simulação energética em que o seu público – alvo eram engenheiros ou arquitetos que desejassem dimensionar sistemas AVAC, otimizar desempenhos energéticos, otimizar custos de vida, entre outros (EnergyPlus™, 2013). Este *software* tem a capacidade de analisar a energia de aquecimento e arrefecimento necessária para manter o ambiente interior do edifício nas condições desejadas. A partir do modelo geométrico, dos *inputs* introduzidos e de um modelo matemático, o *EnergyPlus* permite estimar o consumo energético, temperatura interior, concentração de CO<sub>2</sub>, renovações de ar, entre outros. Desta forma o *EnergyPlus* permite analisar a carga térmica e a análise energética de um edifício, considerando os respectivos sistema de AVAC

introduzidos. Para tal, esta ferramenta simula o edifício e os sistemas associados em diferentes condições ambientais e operacionais. A essência da simulação está no modelo do edifício que utiliza princípios fundamentais de balanço energético. Além disso tem a capacidade de simulação diferenciada, com “time-steps” inferiores a uma hora, sistema modular, cálculo de infiltração de ar diferenciado para cada zona térmica, cálculo de índices de conforto térmico e integração de sistemas como por exemplo sistemas fotovoltaicos.

A equação 2.1 demonstra a forma utilizada pelo *EnergyPlus* para calcular o balanço térmico para uma zona  $z$  para cada *timestep*.

$$C_z \frac{dT_s}{dt} = \sum_{i=1}^{N_{sl}} Q_i + \sum_{i=1}^{N_{sup}} h_i A_i (T_{si} - T_z) + \sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i C_p (T_{zi} - T_z) + \dot{m}_{inf} C_p (T_{\infty} - T_z) + \dot{Q}_{sys} \quad (2.1)$$

Onde:

$C_z \frac{dT_s}{dt}$  – Energia armazenada no ar [W];

$\sum_{i=1}^{N_{sl}} Q_i$  – Somatório de ganhos internos convectivos [W];

$\sum_{i=1}^{N_{sup}} h_i A_i (T_{si} - T_z)$  – Transferência de calor convectivo pelas superfícies da zona [W];

$\sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i C_p (T_{zi} - T_z)$  – Transferência de calor devido à mistura de ar entre zonas [W];

$\dot{m}_{inf} C_p (T_{\infty} - T_z)$  – Transferência de calor devido a infiltração de ar exterior [W];

$\dot{Q}_{sys} = \dot{m}_{sys} C_p (T_{sup} - T_s)$  – Carga térmica do sistema AVAC introduzido na zona [W].

A introdução de um ficheiro climático que represente as condições meteorológicas do local do edifício analisado é crucial para a simulação, uma vez que permite ao programa analisar os ganhos e perdas de energia de um edifício, tendo em conta o clima da região onde se encontra.

O *EP-Launch* é o elo de ligação entre os ficheiros de dados de entrada (*IDF* - *Input Data File* e *Ficheiro Climático*) com o motor de simulação (*Energyplus.exe*). O *IDF Editor* fornece uma abordagem estruturada de edição dos valores de entrada através de um conjunto de objetos onde são inseridos e determinados os parâmetros, condições, características e outros referentes ao edifício em estudo.

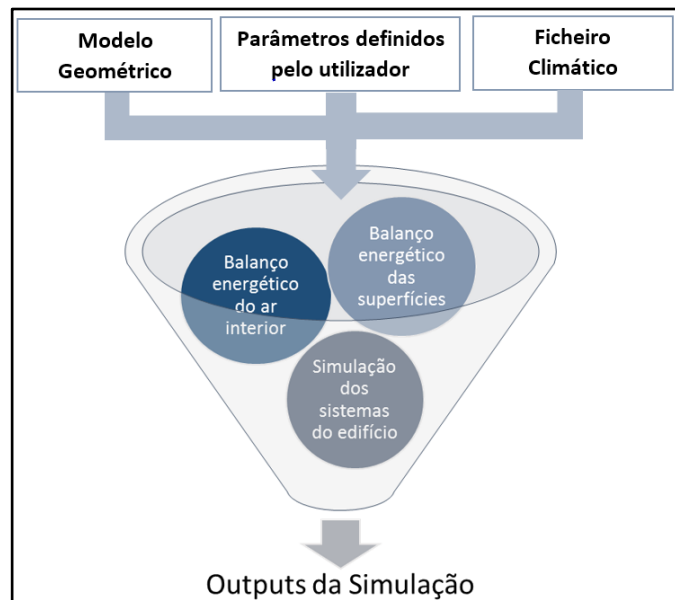


Figura 2.1 - Fases do processo de simulação dinâmica computacional em EnergyPlus. Fonte: (N. M. Mateus, 2014)



## 2.3. Transferência de calor

Por forma a compreender o comportamento térmico de um edifício é fundamental perceber de que modo se processam os mecanismos de transferência de calor. Nos seguintes sub-capítulos serão apresentados alguns conceitos básicos da transferência de calor. Um dos princípios básicos da termodinâmica reflete o fenómeno da transferência de calor ocorrer sempre que existe uma diferença de temperatura entre dois corpos e a energia cedida pelo corpo mais quente é igual a energia recebida pelo corpo mais frio (Rodrigues, 2009).

Este fenómeno pode ocorrer através de três mecanismo distintos:

- Condução;
- Convecção;
- Radiação;

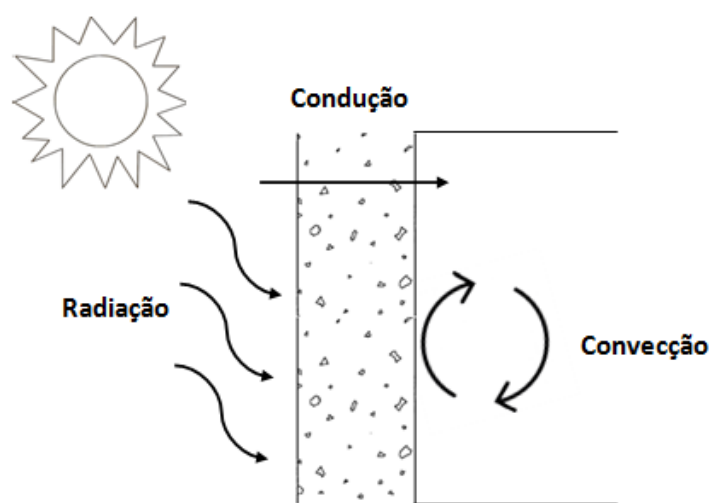


Figura 2.2 - Mecanismos de transferência de calor. Fonte: (Almeida, 2015)

### 2.3.1. Condução

A condução térmica dá-se pela transferência de energia através do contacto direto entre partículas e materiais com temperaturas diferentes, sem que ocorra transporte de massa. Este mecanismo tem um comportamento que difere consoante o estado físico das partículas em contacto. Nos gases a condução térmica ocorre através dos movimentos de translação, rotação, vibração e pela colisão entre as moléculas que constituem o gás. O mesmo se observa nos líquidos, contudo, as moléculas encontram-se mais próximas do que nos gases, o que faz com que a transferência de calor seja mais eficaz. Os sólidos podem ser divididos em duas categorias: não condutores elétricos e condutores elétricos. Os sólidos não condutores elétricos transferem calor por condução por vibração da rede cristalina. O mesmo acontece nos condutores elétricos, podendo ainda haver transferência de calor por condução devido movimento de translação dos eletrões livres (Frank P. Incropera, 2011) (Frank Kreith, 2011).

O fluxo de calor transmitido por condução térmica é dado pela Lei de Fourier (Equação 2.2):

$$q_{cond} = - (k \cdot A) \frac{dt}{dx} \quad (2.2)$$

Onde:

$q_{cond}$  - Fluxo de calor por condução (W);

$k$  - Condutividade térmica do material (W/m.K);

$A$  - Área normal ao fluxo (m<sup>2</sup>);

$\frac{dt}{dx}$  - Gradiente de temperatura na direção  $x$  (K/m).

Sendo que o sinal negativo da equação representa o sentido do fluxo de calor, que é considerado positivo quando realizado no sentido da temperatura mais baixa. A equação acima aplica-se ao caso unidimensional, quando há gradiente de temperatura apenas na direção  $x$ .

### 2.3.2. Convecção

O mecanismo de transferência de calor por convecção tem lugar quando existe uma diferença de temperatura entre um fluido (líquido ou gasoso) e por condução molecular (Magoulès, 2012). Ao contrário do que acontece na condução, na convecção existe efetivamente transporte de massa. A equação da transferência de calor por convecção é dada pela Lei do arrefecimento de Newton:

$$q_{conv} = A \cdot hc \cdot dt \quad (2.3)$$

Onde:

$q_{conv}$  - Fluxo de calor por convecção (W);

$hc$  - Coeficiente de transferência de calor convectivo (W/m<sup>2</sup>. K);

$A$  - Área normal ao fluxo (m<sup>2</sup>);

$dt$  - Diferença de temperatura (K).

### 2.3.3. Radiação

A transferência de calor por radiação acontece quando um corpo a determinada temperatura (superior a 0 K) emite fótons para um meio ou uma superfície a uma temperatura diferente. Neste caso não é necessário um meio material para propagação e a transferência de calor dá-se devido à vibração das moléculas superficiais provocando a emissão de energia radiante através do espaço. (Frank Kreith, 2011). Essa energia será absorvida ou refletida assim que atingir uma superfície.

A energia radiante que um corpo emite é dada pela Lei de Stefan-Boltzmann:

$$q_{rad} = A_1 \cdot \sigma \cdot \varepsilon \cdot T_s^4 \quad (2.4)$$

Onde:

$q_{rad}$  - Fluxo de calor por radiação [W];

$A_1$  - Área da superfície emissora [m<sup>2</sup>];

$\sigma = (5,67 \times 10^{-8})$  - Constante de Stefan-Boltzmann (W.m<sup>-2</sup>.K<sup>-4</sup>)

$\varepsilon$  - Emissividade da superfície emissora

$T$  - Temperatura absoluta da superfície emissora [K].

## 2.4. Caracterização do comportamento térmico de edifícios

Os mecanismos de transferência de calor apresentados anteriormente influenciam diretamente o balanço térmico de um edifício. Neste capítulo é apresentado de que forma esses processos atuam num edifício.

No balanço térmico de um edifício têm de ser considerados alguns parâmetros, sendo eles:

- Ganhos<sup>1</sup> internos – calor gerado no interior do edifício através da atividade metabólica dos ocupantes, iluminação e equipamentos elétricos;
- Ganhos solares – calor gerado pela radiação que incide na envolvente do edifício, tendo maior expressão quando incide nos vãos envidraçados;
- Carga de climatização – Ganhos ou perdas de energia devido aos sistemas de climatização;
- Ganhos de ventilação – Ganhos ou perda de energia gerados pela ventilação do edifício. Esta pode acontecer por forma natural ou com recurso a sistemas mecânicos;
- Transferência de calor pela envolvente do edifício: Ganhos ou perdas de energia por condução, convecção ou radiação através da envolvente do edifício.

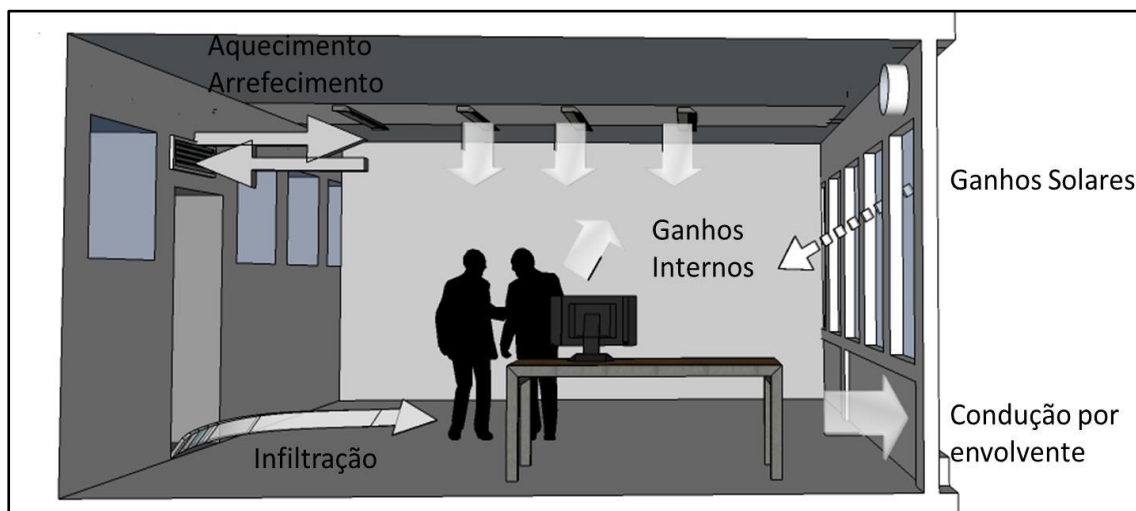


Figura 2.3 – Componentes do balanço térmico num edifício. Fonte: (Fonseca, 2015)

O balanço térmico de um edifício pode ser definido pela equação 2.5. No lado direito da equação encontram-se dois termos distintos. O primeiro ( $\rho \cdot c_p \cdot V_s \cdot \delta t$ ) representa os ganhos devido à energia armazenada no ar do interior do edifício e o segundo ( $\sum_{n=1}^k A_n \cdot U_n \cdot (T_i - T_e)$ ) corresponde às perdas pela envolvente.

$$G_i + G_s + G_c + G_v = \rho \cdot c_p \cdot V_s \cdot \delta t + \sum_{n=1}^k A_n \cdot U_n \cdot (T_i - T_e) \quad (2.5)$$

<sup>1</sup> Considerou-se a terminologia “Ganhos” quer se trate de ganhos ou perdas de energia. Neste contexto, palavra ganho significa transferência de energia num edifício. No caso do ganho representar um aumento da energia no interior do edifício o ganho é positivo, caso contrário, o ganho é negativo.

Onde:

$G_i$  = Ganhos internos (W);

$G_s$  = Ganhos solares (W);

$G_c$  = Ganhos de climatização (W);

$G_v$  = Ganhos de ventilação (W);

$\rho$  = Densidade do fluido (kg/m<sup>3</sup>);

$c_p$  = Calor específico (J/kg.K);

$V_s$  = Volume do fluido (m<sup>3</sup>);

$\delta t$  = Variação de tempo;

$A_n$  = Área da superfície onde se dá a transferência de calor (m<sup>2</sup>);

$U_n$  = Coeficiente de transmissão térmica (W/m<sup>2</sup>.K);

$T_i$  = Temperatura interior (K);

$T_e$  = Temperatura exterior (K);

Os ganhos solares, de climatização e de ventilação podem ser definidos pelas equações (2.6), (2.7) e (2.8), respectivamente:

$$G_s = A_v \cdot F_s \cdot (R_{directa} \cdot \cos(alt) \cdot \cos(azi) + R_{difusa}) \quad (2.6)$$

$$G_c = \rho \cdot C_p \cdot \dot{V} \cdot (T_{ins} - T_i) \quad (2.7)$$

$$G_v = \rho \cdot C_p \cdot \dot{V} \cdot (T_e - T_i) \quad (2.8)$$

Onde:

$A_v$  = Área do envidraçado (m<sup>2</sup>);

$F_s$  = Factor solar;

$R_{directa}$  = Radiação directa (W/m<sup>2</sup>);

$alt$  = Altitude (°);

$azi$  = azimute (°);

$R_{difusa}$  = Radiação difusa (W/m<sup>2</sup>);

$\dot{V}$  = Caudal de fluido (m<sup>3</sup>/s);

$T_{ins}$  = Temperatura de insuflação do ar (K).

### 2.4.1. Soluções construtivas

As soluções construtivas asseguram a separação do espaço interior do espaço exterior. Como referido anteriormente, sempre que há contacto entre dois corpos com temperaturas diferentes, existe transferência de calor por condução. Nesse sentido, sempre que a temperatura exterior é diferente da temperatura interior, existe obrigatoriamente uma transferência de energia sob a forma de calor. Esta transferência de calor ocorre sempre no sentido da temperatura menor, como se representa na figura 2.4.

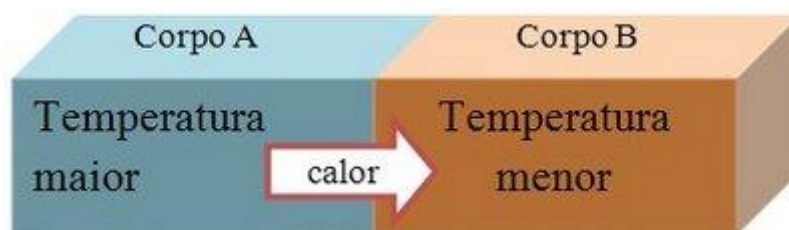


Figura 2.4 - Transferência de calor entre dois corpos em contacto. Fonte: (AIGK, 2011)

A utilização de materiais de construção adequados ao clima onde se encontra o edifício, reduz as trocas de calor com o exterior, conferindo uma maior capacidade para manter as condições interiores desejadas. Como referido anteriormente, o mecanismo da transferência de calor pode ocorrer por condução, convecção e radiação. Sendo assim, não é apenas importante a seleção dos materiais construtivos opacos, mas também os translúcidos como é o caso dos vãos envidraçados. Existem algumas medidas indispensáveis, ao nível das soluções construtivas, para que um edifício apresente um bom desempenho energético. O nível de isolamento é fundamental para reduzir os gastos de energia, garantindo uma redução das perdas de calor no Inverno, bem como dos ganhos energéticos no Verão. Cerca de 25 a 30% das necessidades de aquecimento devem-se às perdas de calor pelas janelas. O isolamento térmico de uma janela depende da qualidade do vidro e do seu caixilho. Os sistemas de vidro duplo ou janela dupla reduzem praticamente para metade as perdas de calor, face a uma janela com vidro simples (ADENE, 2012).

No Verão, os elementos de sombreamento como toldos e persianas, também podem evitar que a temperatura no interior seja muito elevada. Paralelamente, se rodearmos o edifício com plantas, em vez de pavimento de cimento, alcatrão ou similares, podemos diminuir a acumulação de calor e também aumentar o nível de sombreamento (ADENE, 2012).

O estudo aprofundado deste tema fica fora do âmbito desta dissertação pois não está previsto que o edifício em estudo venha a sofrer alterações da sua estrutura, exceto no que diz respeito aos vãos envidraçados.

## 2.5. Conforto Térmico

O conforto térmico define-se como a condição mental que expressa satisfação com a temperatura ambiente e tem uma avaliação subjetiva (ASHRAE, 2010) (Parsons, 2002). Esta condição está principalmente relacionada com aspetos termofisiológicos, ou seja, com a fisiologia e balanço térmico do corpo humano. Os fatores que têm influência no conforto térmico podem ser a temperatura do ar, humidade relativa, temperatura média radiante, velocidade do ar, taxa metabólica, roupa utilizada e idade (Höppe, 2002) (Stathopoulos, 2006). Consequentemente a limitação de um intervalo de temperaturas no interior de um edifício que garante o conforto humano é complexa porque a sensação de conforto varia de pessoa para pessoa.

A Portaria n.º 349-D/2013 define que as condições a respeitar na aplicação do método de simulação dinâmica multizona devem respeitar os limites impostos pelo Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços (RECS) que determina uma temperatura interior compreendida no intervalo de 20°C e 25°C, inclusive, para edifícios com sistemas de climatização. No caso de um edifício híbrido ou passivo deve ser considerada uma temperatura interior compreendida no intervalo de 19°C a 27°C, inclusive (Ministérios do Ambiente, Ordenamento do Território e Energia e da Solidariedade, Emprego e Segurança Social, 2013).

## Capítulo 3 – Sistema de Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado (AVAC)

O AVAC é, como o nome indica, uma tecnologia que serve para satisfazer as necessidades de climatização e renovação do ar no interior de um edifício. No presente capítulo é feita uma introdução ao mercado atual dos sistemas de condicionamento de ar e de seguida serão descritos uma série de componentes que compõem um sistema de AVAC.

### 3.1. Mercado/Estado da Arte

O mercado do ar condicionado (AC) é avaliado em 62 mil milhões de dólares e registou um crescimento de 10% ao ano entre 2006 e 2012. A partir de 2012 houve um abrandamento tendo desde então crescido entre 6 a 7% ao ano (The Freedonia Group, 2007). Esta abrandamento foi impulsionado pela crescente atenção que tem sido dada aos materiais construtivos e outros métodos que visam tornar os edifícios cada vez mais sustentáveis.

A Freedonia Group e a BSRIA – Worldwide Market Intelligence, especialista em estudos de mercado no setor de AVAC, teve acesso às mais recentes análises e avaliações sobre o mercado de ar condicionado no mundo. De acordo com as suas previsões, o crescimento do mercado do AC na Europa e dos E.U.A. não irá acompanhar os índices globais estimados e será nos países emergentes que se registrará um crescimento mais acentuado (Intelligence, 2007).

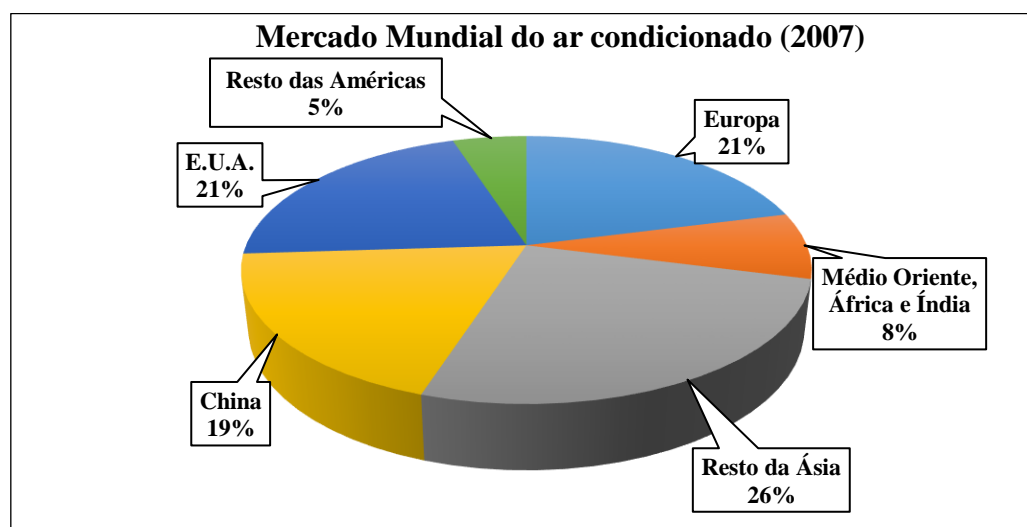


Figura 3.1 - Distribuição do mercado mundial de ar condicionado em termos de valor. Adaptado de: (Intelligence, 2007)

O aquecimento global, as necessidades de mudança no setor da eficiência energética e a consciência ambiental têm sido determinantes no setor de AVAC. As tecnologias mais “amigas do ambiente” têm representado recentemente uma aposta e um investimento estratégico das marcas e contribuído para um significativo impacto no mercado da procura do ar condicionado a nível mundial.

Com 24 milhões de unidades vendidas em 2007, a China é o maior produtor e liderou as vendas destas soluções representando perto de metade do mercado mundial. Em 2011 as vendas do mercado chinês neste segmento atingirão os 35 milhões de unidades. Como já foi referido o segmento dos VRF's foi o que registou maior crescimento, atingindo os 5 mil milhões de dólares, um valor muito próximo dos chillers estimado em 7 mil milhões de dólares (Intelligence, 2007).

## 3.2. Unidade de Tratamento de Ar

Uma Unidade de Tratamento de Ar (UTA) é um dispositivo usado para condicionamento e circulação de ar integrante de um sistema AVAC. Este dispositivo é tipicamente uma caixa metálica de grandes dimensões e é constituído essencialmente por: um ventilador mecânico, elementos de aquecimento e arrefecimento, elementos de filtragem, atenuadores de ruído e as grelhas de admissão e saída de ar.

Depois de tratado, o ar segue pelas condutas do sistema AVAC que distribuem o ar condicionado pelas várias zonas climatizadas do edifício. Em alguns casos existem ainda condutas de extração que retornam o ar para as UTA's onde será novamente condicionado. Em climas temperados, pode ser realizada uma mistura adequada de ar fresco exterior com ar recirculado mais quente vindo do interior com o fim de colocar o ar de insuflação a uma temperatura adequada e tornando o sistema mais eficiente. As UTA's que incluem o seu próprio dispositivo autónomo de aquecimento e arrefecimento de ar e concebidas para serem colocadas na cobertura de um edifício também podem ser chamadas *Roof Top Units* (RTU) (Monteiro, 2016).

A ventilação é cada vez mais uma prioridade pois permite renovar o ar interior e controlar a temperatura, renovar o oxigénio e eliminar a humidade, impurezas e compostos tóxicos (Monteiro, 2016). Com o aumento das exigências do RECS, este dispositivo assume uma importância cada vez maior nos edifícios de serviços.

### 3.2.1. Elementos de aquecimentos/arrefecimento

Para garantir o aquecimento quando necessário, o sistema AVAC possui caldeiras e/ou bombas de calor que aquecem o ar ou água. Esses compostos irão fluir pelas condutas em sistemas de ar forçado ou pela canalização para distribuição da água aquecida. No caso do ar aquecido, durante a época de aquecimento, o ar circula pelas condutas podendo ser insuflado para o interior do edifício e assim aquecer o ar interior. Os sistemas com água incluem bombas para fazerem a água circular e assegurar uma distribuição de calor uniforme por todos os radiadores para transmissão do calor ao ambiente circundante. A água aquecida também pode servir aquecimento de águas quentes sanitárias (AQS) (Monteiro, 2016). Os radiadores devem estar preferencialmente junto ao chão, uma vez que o ar quente, menos denso, sobe, aquecendo todo o espaço. Caso o radiador esteja num ponto alto, o ar quente irá ficar na parte superior do espaço e não terá um aquecimento eficaz. Os radiadores devem ser instalados nas zonas frias, tipicamente junto às janelas, por forma a minimizar a condensação e sensação de frio junta da mesma (Milorad Bojić, 2013).

O ar condicionado garante o arrefecimento do edifício com o auxílio um Arrefecedor de Água (AA) ou Chiller. Este processo passa essencialmente por 4 fases (figura 3.2). O compressor comprime o líquido refrigerante (em estado gasoso), tornando-o mais denso e libertando calor. De seguida o vapor é arrefecido, condensando. O refrigerante, agora líquido, é bombeado para um evaporador que o pulveriza para uma câmara a baixa pressão onde volta a evaporar. Este processo permite que absorva o calor em redor, retirando calor ao ambiente e colocando esse calor no sistema. O refrigerante em vapor volta ao compressor repetindo-se o processo (Refrigeration, s.d.).

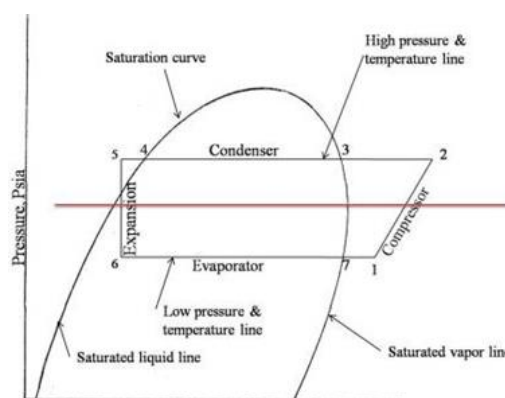


Figura 3.2 – Diagrama da pressão vs entalpia ilustrativo do ciclo de refrigeração. Adaptado de: (Refrigeration, s.d.)



O chiller é o dispositivo principal de uma central de produção de frio. A central de produção de água refrigerada deve ser constituída pelo chiller e um conjunto de acessórios incluindo uma bomba primária de circulação e uma bomba de reserva (Saúde, 2008). Este componente tem a capacidade de manter uma zona interior a uma temperatura inferior à temperatura exterior por transformação da energia mecânica em energia térmica. Por esta razão é também pode ser chamada de máquina frigorífica (Saydaoui, 2010).

Quanto às bombas de calor ou arrefecedores de água reversível (AARV), sendo na sua generalidade equipamentos independentes, são mais recomendáveis os sistemas centralizados, nos quais o calor transferido pela bomba de calor é distribuído por uma rede de condutas de ar e difusores (o mais comum), ou mediante a passagem de ar por entre tubos com água quente (*fan-coils*). A vantagem do sistema é a sua alta eficiência: por cada unidade eletricidade consumida, transfere-se múltiplas unidades de calor dependendo o *coeficiente of performance* (COP) da bomba. Para além disso, a bomba de calor permite, não apenas aquecer a habitação, mas igualmente arrefecê-la (Shenghua Zou, 2017). O funcionamento das bombas de calor baseia-se no movimento da energia térmica na direção oposta ao fluxo espontâneo de calor. O calor flui espontaneamente de lugares mais quentes para lugares mais frios. A bomba de calor pode absorver calor de um espaço mais frio e libertá-lo para um espaço mais quente, e vice-versa. Este processo requer determinada quantidade de energia externa, pois o calor não é conservado. Este funcionamento é semelhante ao ilustrado na figura 3.2, contudo as bombas de calor têm ainda a capacidade de fazer o circuito inverso quando funcionam em modo de aquecimento. As bombas de calor usam um fluido volátil, chamado, fluido refrigerante, que vaporiza ao absorver calor e condensa ao perdê-lo. O refrigerante flui através de tubos isolados entre o evaporador e o condensador, permitindo a transferência eficiente da energia térmica. O seu inconveniente dá-se quando as temperaturas exteriores são muito baixas, pela dificuldade em captar calor.

O sistema AVAC é por isso um sistema completo, garantindo melhor qualidade do ar interior e conforto térmico durante todo o ano.

### 3.2.2. Ventilador

Um dos componentes mais importantes de uma UTA é o ventilador. Este tem a função de movimentar o ar, ou seja, impulsionar o ar condicionado através das condutas. Este dispositivo é tipicamente colocado no final de cada UTA e no início da conduta de insuflação – sendo por isso conhecidos como “ventiladores de insuflação”. Frequentemente os ventiladores são reforçados por ventiladores colocados nas condutas de extração de ar – sendo por isso conhecidos como “ventiladores de extração” que extraem o ar do interior de um edifício de volta para a UTA (Monteiro, 2016).

O ventilador do sistema de AVAC pode ser essencialmente de dois tipos de funcionamento:

1. Sistemas de volume de ar constante (VAC) – funciona com uma única velocidade/potência e fornece um caudal constante ao longo do tempo de funcionamento;
2. Sistemas de volume de ar variável (VAV) –funcionam com uma ampla gama de caudais de ar, permitindo variar o fluxo de ar durante o seu funcionamento.

Os sistemas VAV têm várias vantagens sobre os sistemas VAC (TRANE, 2013) (AAON, 2010):

1. Melhor controlo da temperatura – Os sistemas VAC operam à potência nominal até que a temperatura chegue a um limite especificado e o compressor desliga-se. Este ciclo on/off faz com que a temperatura seja inconstante. Num sistema VAV a insuflação é variável e ajustada às necessidades reais para manter uma temperatura constante;
2. Menor desgaste – Evita o desgaste do ciclo on/off do sistema VAC;
3. Menor consumo de energia – A variação do fluxo de ar permite ajustar a necessidade de insuflação aos ganhos e perdas de calor na zona térmica;
4. Menor ruído – Como o sistema VAV funciona geralmente a uma velocidade inferior ao sistema VAC, produz menos vibrações e consequentemente menos ruído;
5. Maior capacidade de desumidificação – Sendo que o fluxo de ar de um sistema VAV é mais reduzido em determinadas condições, o ar é exposto durante mais tempo à serpentina de arrefecimento, condensando mais humidade nas bobinas. Assim o sistema VAV fornece uma desumidificação mais passiva e torna o espaço mais agradável.

### **3.3.3. Filtros**

Os filtros são uma parte fulcral deste tipo de sistemas e garantem que o ar insuflado para o interior do edifício é efetivamente ar limpo e sem partículas. O módulo dos filtros é tipicamente colocado à entrada de ar da UTA para manter todos os seus componentes limpos. Existe um pré-filtro de saco inicial para filtrar as partículas grossas e de seguida um filtro para partículas mais finas. Este último é de substituição mais dispendiosa, estando protegidos pelo filtro de partículas grossas que é mais robusto e económico.

O tempo de vida de um filtro é determinado através da monitorização das quedas de pressão que ocorrem durante a passagem de ar pelo mesmo, em comparação com o valor inicial. A não substituição de um filtro em fim de vida pode levar ao seu colapso, contaminando toda UTA e o ar introduzido no interior do edifício (Monteiro, 2007).

### **3.3.4. Isoladores de vibrações**

Os ventiladores das UTA's de grandes dimensões funcionam a velocidades muito elevadas e podem produzir vibrações e ruídos que se transmitem ao resto do edifício através das condutas tornando-se desconfortável para os seus ocupantes. As juntas flexíveis colocadas nas condutas imediatamente antes e depois da UTA, bem como na ligação com o compartimento do ventilador podem atenuar o ruído produzido. As juntas flexíveis de neoprene permitem que a UTA vibre, sem transmissão significativa para as condutas. Já a vibração do ventilador é isolada por suspensões do tipo mola (Monteiro, 2007).

## Capítulo 4 – Ventilação

A ventilação é um mecanismo indispensável para manter o conforto térmico no interior de um edifício bem como uma boa qualidade do ar interior (ENERGYPLUS™, 2013). Para determinar a quantidade de renovação de ar adequada numa zona é necessário ter em conta o tipo de actividade que é realizada nesse espaço, pois tem influência direta nos ganhos internos e na concentração de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) (K. Al-Rashidi, 2012).

A ventilação de um edifício pode ser classificada em três tipos diferentes: ventilação natural, mecânica ou híbrida, sendo este último uma combinação dos dois primeiros (Perino, 2008).

### 4.1. Ventilação Natural

O bem-estar e produtividade são fortemente afetados pela qualidade e temperatura do ar interior de um edifício. O conforto térmico é frequentemente alcançado com sistemas de ventilação mecânica apropriados e ar condicionado. Contudo, em climas com temperaturas amenas a ventilação natural poderá ter vários benefícios, principalmente ao nível do arrefecimento, onde o seu correto uso pode trazer o mesmo nível de conforto e com um impacto substancialmente menor no consumo de energia (Sebastian Herkel, 2008).

A ventilação natural, também conhecida como ventilação passiva, utiliza a diferença de pressão e o movimento do ar exterior para climatizar e ventilar o edifício (ADENE, 2016). A ventilação natural encontra-se intimamente relacionada com as renovações de ar. Estas podem ser obtidas de três formas: ventilação natural, ventilação mecânica e infiltração. Quando o ar entra por aberturas próprias, como janelas, a entrada de ar confere ventilação natural ao edifício. No caso do ar entrar por aberturas que não foram introduzidas para ventilação, como por exemplo as fechaduras das portas ou maus isolamentos de janelas, denomina-se infiltração. A ventilação natural é a forma mais fácil, comum e barata de arrefecer e renovar o ar de um espaço fechado. Quando eficaz, este mecanismo confere ao espaço uma temperatura confortável, renovando o ar e diminuindo a energia consumida pelo sistema de AVAC (Sebastian Herkel, 2008) (K. Al-Rashidi, 2012).

Com o aumento da consciência ambiental e beneficiando também da conjuntura económica atual, o interesse pela ventilação natural em edifícios de serviços tem sido crescente. Esta tem-se tornado uma opção bastante válida nos meses mais amenos bem como durante as noites da estação de arrefecimento para fazer *Night-Cooling*, ou seja, arrefecimento noturno. Esta redução da temperatura confere, no início do período de ocupação, uma temperatura mais baixa e que vai subindo com a passar do tempo devido aos ganhos internos, permitindo reduzir o número de horas em que esse limite de temperatura imposto pelo RECS é ultrapassado. É possível ainda garantir a renovação do ar interior, fundamental para remoção de poluentes que assegura a qualidade do ar interior (G. Carrilho Da Graça, 2002) (Yang Wang, 2014).

Para determinar a estratégia adequada ao uso deste mecanismo é preciso ter em consideração a temperatura exterior e humidade relativa. Tipicamente a ventilação natural deverá ser utilizada quando a temperatura exterior se encontra dentro dos limites definidos para a temperatura do ar interior. No entanto, quando a temperatura do ar exterior se encontra próxima do limite superior determinado, poderá não ser vantajosa a utilização da ventilação natural, uma vez que aliado aos ganhos internos, rapidamente a temperatura excederá o limite de conforto. Quando as condições exteriores não são favoráveis, o uso de ventilação natural pode ter o efeito inverso, causando desconforto aos ocupantes e poderá ser necessária ainda mais energia para compensar o uso da mesma. As condições ideais para o uso de

ventilação natural são muito diversificadas e pode depender bastante do uso do edifício, da sua localização e das condições interiores que se deseja (ruído, temperatura, humidade, etc...). Quando o edifício se encontra numa localização onde o ruído exterior é muito elevado, como acontece próximo de zona com trânsito intenso pode dificultar a utilização de ventilação natural porque a abertura das janelas reduz a insonorização do espaço. Por vezes este problema pode ser atenuado com o uso de *louver*s. Adicionalmente, a baixa qualidade do ar exterior pode ser outro entrave a ventilação natural pois irá afetar diretamente a qualidade do ar interior, podendo prejudicar a saúde e bem-estar dos ocupantes. Outro fator, talvez o mais perceptível e valorizado pelas pessoas no geral, é a temperatura. Por exemplo, num dia muito quente, a ventilação natural irá aproximar a temperatura interior da temperatura exterior e desta forma os ventiladores mecânicos terão de consumir mais energia para baixar a temperatura até níveis aceitáveis (Zhiqiang John Zhai, 2011) (Nuno M. Mateus, 2016).

A velocidade do ar que entra num edifício por ventilação natural tem um impacto importante no arrefecimento do mesmo. Quanto maior a velocidade do ar, maior é o arrefecimento efetivo pois o ar quente é extraído a uma velocidade maior. Mesmo um vento com uma velocidade moderado pode reduzir a temperatura sensível em 5°C. Por este motivo as ventoinhas fazem com que as pessoas se sintam mais frescas mesmo que a temperatura do ar seja a mesma (Perino, 2008). Por outro lado, quando excessivo, o vento pode causar algum distúrbio aos ocupantes. Para evitar esses inconvenientes, o guia de conforto térmico ASHRAE 55 relativo à velocidade do ar no interior de um edifício sugere um limite de velocidade de ar para cada tipo de utilização (ASHRAE, 2003).

No caso de Portugal, em que o clima é temperado e onde os edifícios de serviços têm necessidade de arrefecimento durante quase todo o ano, a poupança de energia dos sistemas de climatização pode rondar os 30% (R. Ramponi, 2014).

#### 4.1.1. Estratégias de ventilação natural e influência da rugosidade do terreno

A eficácia da ventilação natural varia com a localização do edifício, uma vez que é diretamente influenciada pelo vento. O ar flui de zonas de alta pressão para zonas de baixa pressão originando o vento (AutoDesk - Sustainability WorkShop, 2015).

O ar pode comportar-se de diversas formas consoante as aberturas existentes. Normalmente a estratégia mais eficaz é a chamada *cross ventilation*. Esta estratégia ocorre quando existem abertura em duas superfícies diferentes como acontece nas duas ultimas imagens da figura. Nestes casos o ar atravessa geralmente toda a sala contrariamente ao que acontece nas outras estratégias (Zhiqiang John Zhai, 2011).

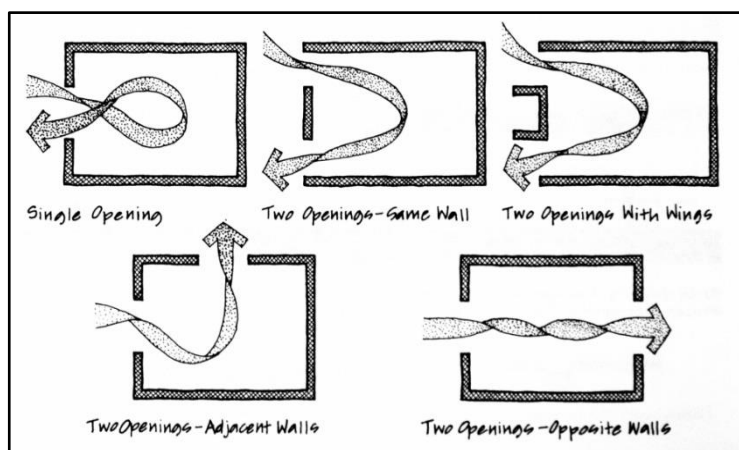


Figura 4.1 – Estratégias de ventilação natural. Fonte: (AutoDesk Sustainability Workshop, 2015)

Os edifícios são obstruções naturais ao vento. Quando o vento encontra uma obstrução, este flui em redor do objeto e continua o seu movimento na mesma direção com um movimento que é similar ao que acontece com os líquidos. A velocidade do vento varia com a altura e com a rugosidade do terreno (altura das obstruções) do seguinte modo: vento aumenta com a altitude e diminui com a rugosidade do terreno. Assim o vento num meio rural e sem obstruções aumenta muito mais rápido com a altitude do que comparado com o vento num meio urbano. Esta taxa de aumento da velocidade do vento é conhecida como perfil ou gradiente de vento (AutoDesk Sustainability Workshop, 2015).

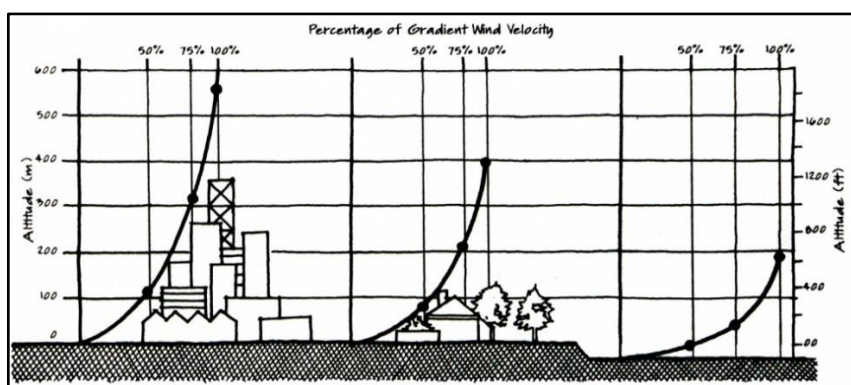


Figura 4.2 – Dependência da velocidade do vento em altura com a rugosidade do terreno. Fonte: (AutoDesk Sustainability Workshop, 2015)

## 4.2. Ventilação Mecânica

É considerada ventilação mecânica sempre que a renovação do ar interior é feita com recurso a um equipamento mecânico, ou seja, com dispêndio de energia. Nos grandes edifícios de serviços, é geralmente utilizado um sistema de climatização central como é o caso das UTA's. Neste equipamento, o fluido térmico de distribuição transfere ou retira calor, conforme o modo de funcionamento, para o ar que será introduzido no edifício. (Behrang Chenari, 2016)

## 4.3. Ventilação Híbrida

Os sistemas de ventilação natural são controláveis, contudo, as condições climatéricas são imprevisíveis o que dificulta a manutenção das condições de temperatura e de qualidade do ar durante todo o ano (Yi Jiang, 2003). Por forma a cumprir todas as exigências do RECS muitas vezes é necessário dimensionar um sistema de climatização mecânico.

A ventilação híbrida, como o nome indica, resulta da combinação dos dois tipos de ventilação anteriores. Neste caso, é sempre dada prioridade à ventilação natural devido às vantagens óbvias que apresenta. A ventilação mecânica funciona assim como um *backup*, sendo utilizada apenas quando as condições exteriores não são favoráveis à ventilação natural (Young-hoon Kim, 2015). A ventilação híbrida é o tipo de ventilação que confere mais garantias de conforto e promove a eficiência energética uma vez que é dada a prioridade à ventilação natural (Zhiqiang John Zhai, 2011). No edifício estudado existe um sistema central de AVAC que está em funcionamento todo o dia (7h-20h). Pretende-se tirar o máximo partido da ventilação natural e assim reduzir o quanto possível as necessidades de aquecimento e arrefecimento. Este ponto será discutido mais adiante no Capítulo 6.

## Capítulo 5 – Caso de Estudo

O presente capítulo serve para descrever o edifício analisado nesta dissertação bem como o seu sistema de AVAC. O edifício em estudo é o edifício C8 Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, na rua Ernesto de Vasconcelos, no Campo Grande (1749-016 Lisboa) (Google Earth, 2016). Este é o edifício mais a norte da faculdade e tem as seguintes coordenadas geográficas:

- Coordenadas: 38° 45' 25,75" N; 9°09' 25,74" O.
- Azimute: -20° S.



Figura 5.1: Fachada este do edifício C8 FCUL (esquerda) e cobertura do edifício com identificação do bloco climatizado por cada UTA (direita).

### 5.1. Descrição do edifício

O edifício C8, é uma das estruturas mais recentes no campus da FCUL, é uma construção maioritariamente formada por betão, tem uma área útil de pavimento de cerca de 19.500 m<sup>2</sup> e foi construído no ano de 2000. O edifício tem seis pisos, sendo um deles parcialmente em cave, com ocupações muito distintas, como laboratórios, salas de aula, gabinetes, anfiteatros, biblioteca e espaços diversos como corredores, arredações e áreas técnicas.

É constituído por dois corpos, destinando-se o corpo Norte ao Departamento de Química e o corpo Sul ao Departamento de Física e ao Departamento de Engenharia Geográfica, Geofísica e Energia. No piso 1 ficam alguns laboratórios, a biblioteca, salas de aula e espaços diversos. O piso 2 é essencialmente destinado a salas de aula, serviços administrativos e aos anfiteatros, tendo ainda alguns laboratórios. Do piso 3 ao piso 5 a dominância é de laboratórios e gabinetes. O piso 6 tem os gabinetes da Direcção, alguns laboratórios, mas é dominado pelas duas grandes zonas técnicas do sistema AVAC, uma a Norte e outra a Sul. A distribuição da ocupação da área útil de pavimento encontra-se ilustrada na figura 5.2.

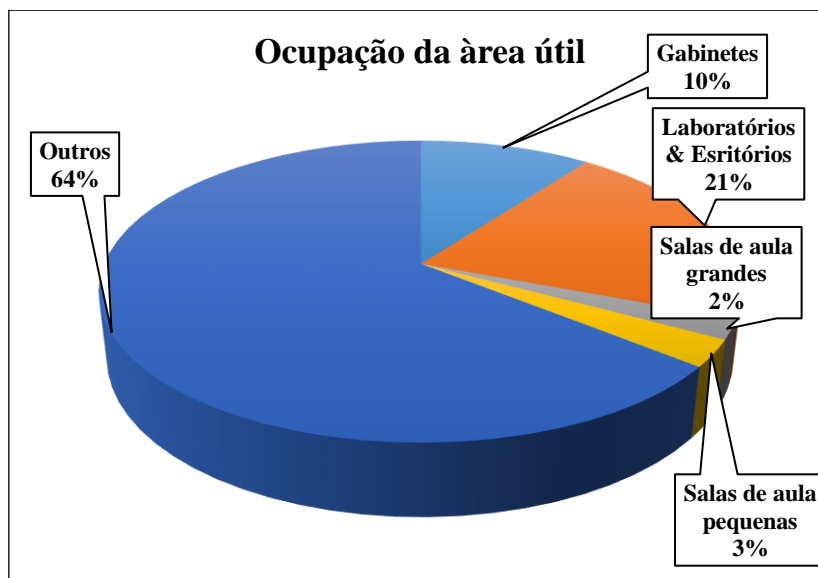


Figura 5.2: Ocupação da área útil de pavimento.

Ao longo deste trabalho serão focados quatro espaços com diferentes utilizações: salas de aula pequenas, salas de aula grandes, escritórios e gabinetes. Os espaços designados como “outros” incluem os auditórios, casas de banho, bar, biblioteca, zonas técnicas, arrecadações e zonas comuns como corredores.

As salas de aula estão subdivididas em salas de aula grandes e salas de aula pequenas. Tipicamente uma sala de aula pequena tem uma área de 35 m<sup>2</sup> e capacidade para 24 alunos. Na sala selecionada a janela encontra-se orientada a Norte e é constituída por vidro simples que percorre toda a largura da sala e tem 2 metros de altura. Também tem sombreamento exterior como é apresentado na figura 5.3.



Figura 5.3 – Exemplo típico de uma sala de aula pequena e tipo de sombreamento utilizado

A sala grande tem uma área de 52 m<sup>2</sup> e capacidade para 40 alunos. Esta sala tem uma janela com vidro duplo que percorre toda a fachada Sul. Nesta sala encontram-se duas janelas com eixo de abertura vertical. As janelas contêm sombreamento exterior e uma pala. A sala de aula grande que representa a generalidade encontra-se na figura 5.4.



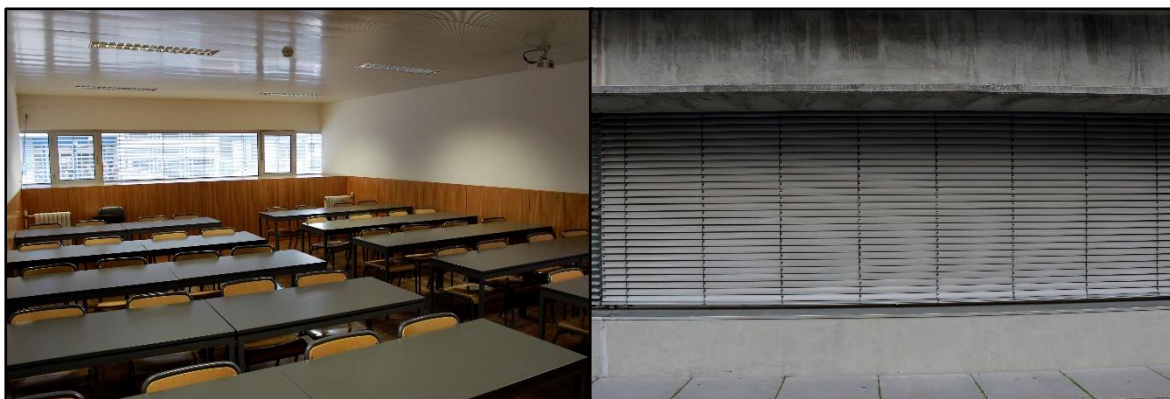


Figura 5.4 – Exemplo típico de uma sala de aula grande e tipo de sombreamento utilizado.

O gabinete que representa a generalidade dos espaços com a mesma utilização tem uma área de 12m<sup>2</sup>. A janela acompanha todo o comprimento da parede Este e tem uma abertura com eixo vertical. O sombreamento é idêntico ao ilustrado na figura 5.4, sendo constituído pela *blind* e pala.

Os escritórios<sup>2</sup> são espaços que foram desenhados em projeto para funcionar como laboratórios, no entanto, com o tempo deixaram de ser utilizados como tal. Tem uma área de 52 m<sup>2</sup> e, mais uma vez, o sombreamento exterior é semelhante ao da figura 5.4. A janela também é semelhante ao da sala de aula grande, tendo duas janelas com eixo de abertura vertical e está orientada a Sul. Todos os espaços anteriormente descritos têm um pé alto de 2.6 m.



Figura 5.5 – Em cima o exemplo de um gabinete típico, em baixo um escritório comum do edifício C8.

## 5.2. Soluções construtivas

Neste capítulo são apresentadas as soluções construtivas e vãos envidraçados presentes no edifício C8. Esta informação encontra-se no projeto de Arquitectura da empresa GBMM - Arquitectos Associados, LDA dos Engenheiros Gonçalo de Sousa Bryne, Manuel Aires Mateus, Falcão de Campos (Arquitectos Associados, 1995). Este documento foi fornecido pelo Sr. José Fernandes, dos serviços técnicos da FCUL.

<sup>2</sup> Decretou-se o nome “escritórios” a todos os espaços definidos como laboratórios em projeto mas que atualmente são utilizados exatamente como escritórios. Estes “ex-laboratórios” não têm hottes e foram todos verificados visualmente a fim de confirmar a sua verdadeira utilidade.



### 5.2.1. Paredes exteriores

As paredes exteriores do edifício têm uma constituição semelhante à ilustração da figura 5.6. Esta ilustração segue a seguinte ordem de construção, do interior para o exterior:

- Lambril em Madeira (34) – Camada de madeira com 2 cm de espessura e 1,10 m de altura (esta camada não foi considerada na simulação dinâmica por não ser comum a todas as salas);
- Estuque (32) – Camada de estuque com 2 cm de espessura;
- Alvenaria Simples (3) – Camada de alvenaria com 20 cm de espessura;
- Reboco de Parede Hidrofugado (31) – Camada de reboco com 2 cm de espessura;
- Isolamento com Placas de Poliestireno Extrudido (14) - Camada de Poliestireno Extrudido com 3 cm de espessura;
- Revestimento de Parede Exterior com Painéis de Betão Pré-Moldado (36) – Camada de Betão Pré-Moldado com 12 cm de espessura.

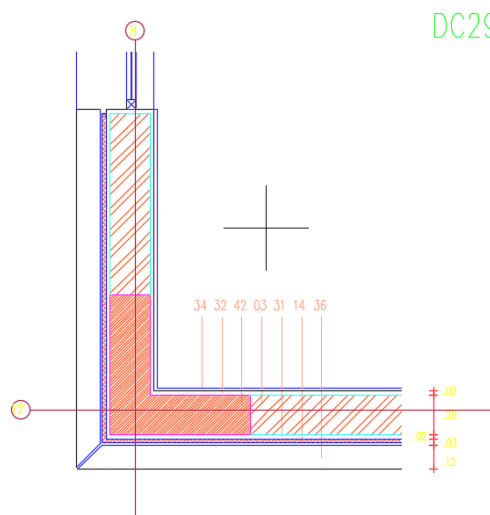


Figura 5.6 – Constituição das paredes exteriores do edifício C8 FCUL

Na tabela 5.1 encontra-se as propriedades dos materiais de construção das paredes exteriores. A tabela está organizada da constituição exterior para o interior.

Tabela 5.1 - Características dos materiais de construção da parede exterior (PROTOLAB, 2014) (C. A. P. Santos, 2006)

	Material	Espessura (m)	Condutividade (W/m.K)	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	Calor específico (J/kg.K)
<b>Parede exterior</b>	Betão pré-moldado	0.12	0.7	1600	2000
	Poliestireno extrudido	0.03	0.035	38	38
	Reboco	0.02	0.9	1900	2000
	Alvenaria	0.2	0.6	1600	2000
	Estuque	0.02	0.5	1200	800

### 5.2.2. Paredes interiores

As paredes interiores do edifício têm uma constituição semelhante à ilustração da figura 5.7. Esta ilustração segue a seguinte ordem de construção, do interior para o exterior:

- Estuque (32) – Camada de estuque com 2 cm de espessura;
- Alvenaria Dupla (4) – Camada de alvenaria com 11 cm de espessura;
- Ar – Caixa de ar com 3 cm de espessura;
- Alvenaria Dupla (4) – Camada de alvenaria com 11 cm de espessura;
- Estuque (32) – Camada de estuque com 2 cm de espessura;

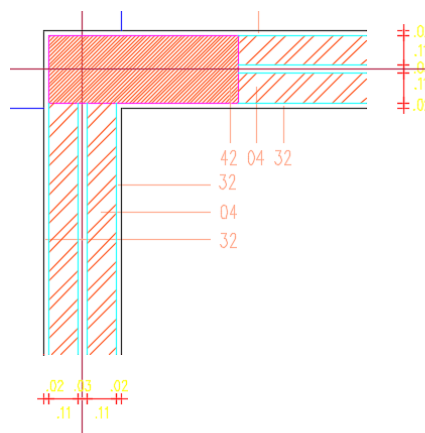


Figura 5.7 – Constituição das paredes interiores do edifício C8 FCUL

Na tabela 5.2 encontra-se as propriedades dos materiais de construção das paredes interiores. A tabela está organizada da constituição exterior para o interior

Tabela 5.2 - Características dos materiais de construção da parede interior (PROTOLAB, 2014) (C. A. P. Santos, 2006)

	Material	Espessura (m)	Condutividade (W/m.K)	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	Calor específico (J/kg.K)
<b>Parede interior</b>	Estuque	0.02	0.5	1200	800
	Alvenaria	0.11	0.6	1600	2000
	Ar	0.03	0.023	1.2	1000
	Alvenaria	0.11	0.6	1600	2000
	Estuque	0.02	0.5	1200	800

## Pavimento e Cobertura<sup>3</sup>

O pavimento do edifício tem uma constituição semelhante à ilustração da figura X. Esta ilustração segue a seguinte ordem de construção, do interior para o exterior:

- Estuque (32) – Camada de estuque com 2 cm de espessura;
- Elemento de betão estrutural (42) – Camada de betão estrutural com 30 cm de espessura;
- Pavimento (27) – Camada de Pavimento (geralmente madeira, excepto nos corredores) com 8 cm de espessura;

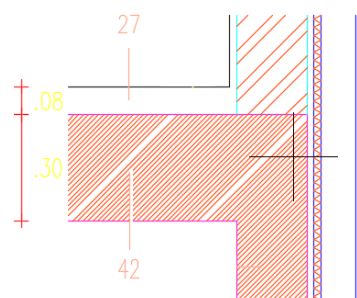


Figura 5.8 – Constituição do pavimento do edifício C8 FCUL.

Na tabela 5.3 encontra-se as propriedades dos materiais de construção do pavimento e da cobertura dos pisos 1 a 5. A tabela está organizada da constituição exterior para o interior.

Tabela 5.3 - Características dos materiais de construção do pavimento e cobertura (PROTOLAB, 2014) (C. A. P. Santos, 2006)

	Material	Espessura (m)	Condutividade (W/m.K)	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	Calor específico (J/kg.K)
<b>Pavimento</b>	Estuque	0.02	0.5	1200	800
	Betão estrutural	0.3	0.9	1900	2000
	Madeira	0.08	0.14	550	1750
<b>Cobertura</b>	Madeira	0.08	0.14	550	1750
	Betão estrutural	0.3	0.9	1900	2000
	Estuque	0.02	0.5	1200	800

### 5.2.3. Vãos Envidraçados<sup>4</sup>

Os vãos envidraçados do C8 são geralmente constituídos por uma janela dupla com a seguinte estrutura:

- Vidro: Camada de vidro com 6 mm;

<sup>3</sup> Considerou-se que a estrutura da cobertura corresponde ao constituição inversa do pavimento, uma vez que o pavimento de um dos pisos é o teto do piso imediatamente abaixo.

<sup>4</sup> Em alguns casos específicos a janela é constituída por vidro simples. Nestes casos a janela é constituída apenas por uma camada de vidro de 6mm sendo o caixilho de alumínio semelhante ao utilizada nas janelas duplas.

- Ar : Caixa de ar com 13mm de espessura;
- Vidro: Camada de vidro com 6 mm;
- Caixilho: O caixilho de alumínio.



Figura 5.9 – Exemplo de vidro simples (esquerda) e de vidro duplo (direita). As janelas de vidro simples não apresentam aberturas enquanto as janelas de vidro duplo têm uma abertura com eixo vertical.

Na tabela 5.4 encontra-se as propriedades do vidro consideradas. No anexo I encontram-se algumas das propriedades utilizadas na seguinte tabela.

Tabela 5.4 - Características dos materiais de construção dos vãos envidraçados (PROTOLAB, 2014) (C. A. P. Santos, 2006)

Materiais	Vidro Simples		Vidro Duplo	
	Vidro	Vidro	Ar	Vidro
<b>Espessura (m)</b>	0.006	0.006	0.013	0.006
<b>Condutividade (W/m.K)</b>	0.800	0.800	-	0.800
<b>Transmissividade solar</b>	0.775	0.775	-	0.775
<b>Refletividade solar, frente</b>	0.075	0.075	-	0.075
<b>Refletividade solar, trás</b>	0.075	0.075	-	0.075
<b>Transmissividade visível</b>	0.898	0.898	-	0.898
<b>Refletividade visível, frente</b>	0.081	0.081	-	0.081
<b>Refletividade visível, trás</b>	0.081	0.081	-	0.081
<b>Transmissividade infra-vermelho</b>	0.000	0.000	-	0.000
<b>Emissividade infra-vermelho, frente</b>	0.840	0.840	-	0.840
<b>Emissividade infra-vermelho, trás</b>	0.840	0.840	-	0.840

### 5.2.4. Sombreamento<sup>5</sup>

O sombreamento é geralmente assegurado por um dispositivo tipo *Blind* e com uma pala de betão. A *Blind* cobre todo o vão envidraçado e é constituído por ripas de alumínio. As palas são constituídas por painéis de betão pré-moldado com espessura de 8 cm e largura de 80 cm. Nas figuras 5.3 e 5.4 apresentadas anteriormente é possível ver os dois tipos de sombreamento referidos. Na tabela 5.5 encontra-se as propriedades da *blind* de sombreamento.

Tabela 5.5 - Características da '*Blind*' de sombreamento (N. M. Mateus, 2014)

<b>Orientação das lâminas</b>	Horizontal
<b>Largura das lâminas (m)</b>	0.080
<b>Separação vertical entre telas (m)</b>	0.020
<b>Espessura das lâminas (m)</b>	0.001
<b>Ângulo de posição das lâminas (°)</b>	45.000
<b>Condutividade (W/m.K)</b>	0.900
<b>Transmissividade Solar</b>	0.000
<b>Refletividade solar, frente</b>	0.800
<b>Refletividade solar, trás</b>	0.800
<b>Refletividade radiação difusa, frente</b>	0.800
<b>Refletividade radiação difusa, trás</b>	90.000
<b>Transmissividade visível</b>	0.000
<b>Transmissividade infra-vermelho</b>	0.000
<b>Emissividade infra-vermelho, frente</b>	0.630
<b>Emissividade infra-vermelho, trás</b>	0.630
<b>Distância ao vidro (m)</b>	0.050
<b>Ângulo mínimo (°)</b>	0.000
<b>Ângulo máximo(°)</b>	90.000

### 5.3. Sistemas de climatização

Serve o presente capítulo para descrever os sistemas de climatização e renovação do ar no edifício. A informação recolhida foi essencialmente obtida por várias vistorias feitas ao longo da realização do trabalho bem como através dos cadernos de projeto de execução (José Galvão Teles, Engenheiros, Lda., 1995).

<sup>5</sup> As zonas que têm janelas que não pertencem a nenhuma das quatro fachadas exteriores do edifício, ou seja, janelas que dão para pátios, (ver figura x), não têm palas. Nesses casos o sombreamento é feito apenas com as *Blinds*

### 5.3.1. Descrição dos sistemas

#### Unidades de tratamento de ar

Os edifícios contêm na sua cobertura quatro UTA's que dividem o edifício da seguinte forma:

- UTA A – Responsável pela climatização do bloco sudoeste (SW) do edifício.
- UTA B – Responsável pela climatização do bloco sudeste (SE) do edifício.
- UTA C – Responsável pela climatização do bloco noroeste (NW) do edifício.
- UTA D – Responsável pela climatização do bloco nordeste (NE) do edifício.

As UTA's são responsáveis pela renovação de ar e climatização do edifício e existem quatro instaladas no terraço do edifício. Estas UTA's são 100% ar novo e por isso designam-se Unidades de Tratamento de Ar Novo (UTAN). Estas UTA's diferenciam-se por não aproveitarem a energia térmica proveniente do ar de retorno sendo esse ar expelido para o ambiente.

No presente estudo, o ventilador da UTA é um ventilador VAC, ou seja, opera a uma potência constante independente da necessidade de climatização do edifício. Esta característica faz com que, por vezes, o consumo de energia seja superior ao necessário. Cada ventilador das UTA's A e B tem 5,5 kW de potência elétrica enquanto os ventiladores das UTA's C e D têm 9 kW de potência elétrica. Será estudado o efeito da introdução de VV nos ventiladores e assim tirar proveito do potencial de poupança.

As unidades de ar primário, UAP/A a D, do modelo Ciat GI, obedecem às características indicadas de seguida:

-Módulo de filtro plano com filtro de manta lavável;

-Módulo de aquecimento, alimentado com água da caldeira, com permutador de tubos de cobre e alhetas de alumínio, e colectores de aço galvanizados ou com pintura anticorrosão. Permutador facilmente amovível para reparação. Com termómetro na ida e retorno da água. Controlo por válvula modulante de três vias;

-Modulo de arrefecimento, alimentado com água do AA, com permutador de tubos de cobre e alhetas de alumínio, e colectores de aço galvanizados ou com pintura anticorrosão. Permutador facilmente amovível para reparação. Com termómetro na ida e retorno da água. Controlo por válvula modulante de três vias;

-Módulo de ventilação de insuflação com ventilador centrifugo de pás curvas para diante instalado sobre calços anti vibração; acionamento por motor elétrico trifásico e transmissão por correias trapezoidais; sobredimensionada de modo a poder funcionar com uma correia partida. Com transmissão ajustável em pelo menos 10%. Veio apoiado em chumaceiras com rolamentos de esferas com tempo de vida não inferior a 18000 horas.

-Módulo de filtragem com filtro de bolsas, não lavável

Os módulos incluem sensores de temperatura para interligação com o sistema de controlo e consequente atuação das válvulas de três vias dos permutadores. O apoio da unidade será feito em estrado metálico, garantindo-se a total ausência de transmissão de vibrações ao edifício, se necessário por montagem de calços anti vibração.

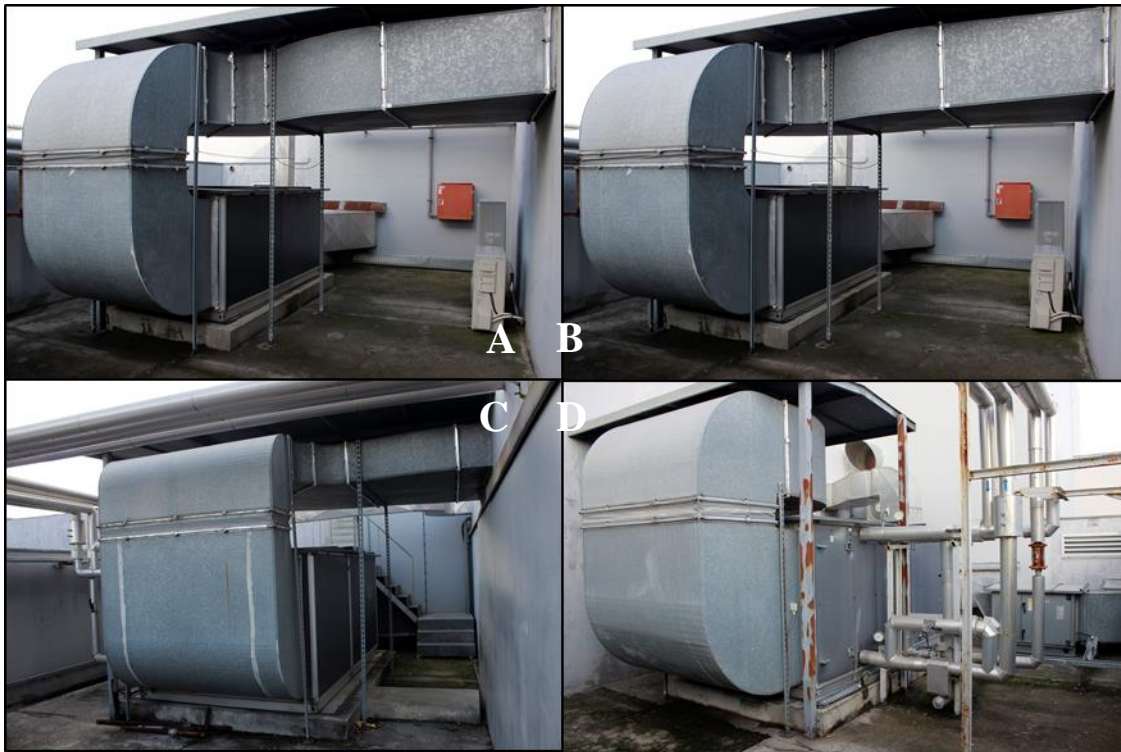


Figura 5.10 - Unidades de ar principal (UAP's) A, B, C e D.

#### Unidades de tratamento de ar (de menor dimensão)

Existem ainda seis UTA's de menor potência, do modelo Ciat FE, instaladas no interior do edifício que são responsáveis pela climatização dos auditórios e da biblioteca e operam de acordo com o período de funcionamento de cada divisão. Estas UTA's não serão alvo da intervenção neste projeto ficando assim fora do caso de estudo.

Estas UTA's de menor dimensão, denominadas UTA/1.BIB.1 e 2, UTA/2.4.14. A 1 e 2, UTA/2.4.14. B 1 e 2, ao contrário das UTA's anteriores, têm reaproveitamento do ar de retorno e variador de velocidade de pelo menos, 50 a 100% do caudal. As UTA's responsáveis pela climatização dos auditórios, UTA/2.4.14 A 1 e 2, UTA/2.4.14 B 1 e 2 têm um caudal de insuflação de 800 l/s e uma pressão disponível de 210 Pa. A potência de arrefecimento é de 16,6 kW enquanto a potência de aquecimento é de 19,2 kW. As UTA's responsáveis pela climatização da biblioteca, UTA/1.BIB.1 e 2 têm um caudal de insuflação de 900 l/s e uma pressão disponível de 250 Pa. A potência de arrefecimento é de 14,9 kW enquanto a potência de aquecimento é de 14,3 kW.

#### Caldeira

Existem duas centrais térmicas na cobertura, uma do lado norte, servindo o corpo norte do edifício, e outra do lado sul, servindo o corpo sul. Cada uma delas tem a sua casa de caldeira a gás natural, onde ficam duas caldeiras para produção de água quente. A água quente sai das caldeiras a 85°C e retorna a 70°C. As caldeiras são alimentadas por gás natural e são responsáveis pela climatização do edifício durante a estação de aquecimento.



Como referido anteriormente existem no total quatro caldeiras, denominadas CA/N1 e 2 e CA/S1 e 2, com a especificação genérica seguinte:

- Lamborghini Super Prex 90: Caldeira monobloco, em aço, com câmara de combustão pressurizada, adaptada para combustão de gás natural, com rendimento não inferior a 90% com referência a um teor de CO<sub>2</sub> superior a 10%.

A potência térmica total de cada caldeira da ala Norte é de 181 kW enquanto cada caldeira da ala Sul tem uma potência térmica total de 140 kW. Existem ainda dois depósitos isolados, DI/N e DI/S, de 2000 litros cada, destinados a conferir maior inércia térmica ao sistema.

### Radiadores<sup>6</sup>

Os radiadores estão presentes na maioria das salas do edifício C8 FCUL e podem ter um papel determinante no conforto térmico dos ocupantes durante a estação de aquecimento. A figura 5.11 ilustra os radiadores utilizados no edifício em estudo

Os aquecedores por circulação de água são os mais baratos e mais comuns em edifícios de grandes dimensões. Neste caso, a água quente aquecida pelas caldeiras, circula pelos radiadores que assim aquecem o espaço por convecção e radiação (AutoDesk Sustainability Workshop, 2015).



Figura 5.11 – Radiador típico do edifício C8 FCUL

### Arrefecedores de água ou Chiller

Para produção de água fria cada central térmica dispõe de um chiller. Os dois chiller's, do modelo Ciat RZ + MRS1, denominados AA/N e AA/S, possuem uma máquina frigorífica e um permutador de calor incorporados e um condensador arrefecido a ar. Para uma temperatura de 32°C do ar ambiente a água fria é fornecida a 7°C e retorna a 12°C. O AA/N tem uma potência útil de 169 kW e um caudal de água de 29100 l/h. O AA/S tem uma potência útil de 105 kW e um caudal de água de 18100 l/h. Ambos estão preparados para funcionar com temperaturas exteriores entre 3 e 45°C.

<sup>6</sup> Não foi possível conhecer as características específicas dos radiadores





Figura 5.12 - Chiller's da UTA Norte (esquerda) e da UTA Sul (direita)

### Arrefecedores de água reversíveis ou Bombas de Calor

Na central norte estão também instaladas três bombas de calor que alimentam as UTA's dos anfiteatros e da biblioteca. Estes dispositivos não serão alvo da intervenção planeada neste projeto ficando assim fora do caso de estudo, contudo, será feita uma descrição dos mesmos como procedido nos equipamentos anteriores.

O edifício conta no total com três bombas de calor, do modelo CIAT IMA, denominados AARV 2.4.14 A e B e 2.4.15, funcionando com temperatura exterior entre 0 e 45°C. Em regime de aquecimento os AARV 2.114 A e B têm uma potência térmica útil de 21 kW e o AARV 2.4.15 uma potência térmica útil de 16 kW. Já para regime de arrefecimento os AARV 2.114 A e B têm uma potência térmica útil de 26 kW e o AARV 2.4.15 uma potência térmica útil de 20 kW. No que diz respeito ao caudal de água, os AARV 2.4.14 A e B contam com 4500 l/h enquanto o AARV 2.4.15 tem um caudal de 3500 l/h. Na figura 5.13 são apresentadas as três bombas de calor da ala Norte do edifício.



Figura 5.13 – Bombas de calor na zona técnica norte do edifício C8.

### **Redes de distribuição de água**

A rede de distribuição de água quente do aquecimento central segue, em cada corpo, por dois ductos verticais, ramificando-se as prumadas em cada piso. A rede de cada piso é relativamente curta pois, o edifício acaba por ser dividido da seguinte forma: Quadrante A = SW; B = SE; C = NW; D = NE. À entrada de cada piso há uma válvula de isolamento e outra de regulação e medição de caudal, para permitir afinar facilmente a repartição de água quente pelos pisos e para adaptação a alterações no futuro.

A rede que alimenta os convectores (CV's) passa em geral pelo piso inferior, fazendo-se furos nas lajes para as ligações aos aparelhos. Para os ventiloconectores (VCA's), que são de montagem horizontal junto ao teto, a alimentação é a partir das tubagens que passam no corredor.

A distribuição de água fria dos AA's é praticamente só nas zonas técnicas do piso 6 dado que alimentam quase exclusivamente as UAP's. A rede dos AARV's desce no ducto do quadrante D (NE) até ao piso 1 e dirige-se às UTA's e VC's dos Anfiteatros. Nesta dissertação, os Anfiteatros não são alvo de estudo pois ficam fora das zonas intervencionadas.

### **Rede de condutas**

Há quatro redes de condutas de ar primário que começam nas UAP's e descem pelos ductos, ramificando-se para os corredores e salas. Sobem também nos ductos as condutas de exaustão, até ao piso 6, onde ficam os respectivos ventiladores (excepção feita a algumas exaustões, com ventiladores junto ao local tratado).

### **Resumo do sistema de climatização do edifício C8**

- A renovação do ar é feita com sistemas mecânicos, nomeadamente UTA's que garantem a ventilação do edifício. A extração do ar viciado é feita com ventiladores de extração.
- Os chiller's que estão ligados às UTA's são responsáveis pelo arrefecimento do edifício.
- As caldeiras a gás natural alimentam os radiadores e garantem as necessidades de aquecimento. Estão também ligadas às UTA's que insuflam o ar climatizado para o interior do edifício.
- Os auditórios e biblioteca têm sistemas de climatização independentes do resto do edifício. Possem UTA's próprias que estão ligadas a bombas de calor que suprem as necessidades de aquecimento e de arrefecimento.

## **5.3.2. Sistemas de climatização por divisões**

### **Salas de aula, gabinete, escritórios, salas administrativas**

As salas de aula, gabinete, escritórios e salas administrativas têm aquecimento e ar primário. Usam-se CV's estáticos vulgarmente designados radiadores, dispondo de termostato mecânico para economia de energia e adequação à carga térmica, que é muito variável.

O ar primário é insuflado a partir de condutas no teto do corretor, passando depois para o corredor por grelhas de parede. Em certos casos, em que é necessária muita insuflação de ar devido ao elevado perfil ocupação do espaço, a exaustão é também forçada.

### **Anfiteatros**

Cada um dos dois anfiteatros grandes é climatizado por duas UTA's (UTA 2.4.14A 1 e 2, 2.4.14 B 1 e 2) colocadas junto ao teto do piso 1, sendo a insuflação assegurada por difusores lineares e o retorno é por grelhas no estrado. O ar novo é recolhido no pátio e a sua exaustão dá-se através da grelha no estrado, com o ventilador (VE) 2.4.14. Cada anfiteatro grande tem ainda um AARV próprio pelo que possui completa autonomia em relação ao edifício.

Os dois anfiteatros pequenos têm VCA's, que recebem o ar primário da rede do piso 1, sendo a exaustão por frestas no teto falso, com a conduta a passar na parede dupla e ficando os ventiladores VE/2.4.15 no piso 1. Os anfiteatros pequenos têm um único AARV, pelo que são independentes do edifício, mas dependentes entre eles.

### **Biblioteca**

A biblioteca tem climatização por duas UTA's na garagem (UTA/1.BIB.1 e 2), que vão buscar ar novo ao pátio e que recebem água fria e quente da rede geral do edifício. A insuflação é por difusores lineares e o retorno por grelhas.

## Capítulo 6 – Análise do funcionamento do sistema de AVAC

Este capítulo assume a função de estudar o funcionamento atual do sistema de AVAC. A primeira etapa consistiu no reconhecimento visual do sistema de AVAC e posterior recolha de informação referente ao edifício em estudo. Foram disponibilizados alguns documentos que permitiram uma caracterização mais exata do edifício, nomeadamente:

1. Projeto de execução de sistema de climatização (José Galvão Teles, Engenheiros, Lda., 1995): Características das dos componentes do sistema de AVAC;
2. Projetos de arquitetura dos circuitos aeráulicos de sistema de AVAC (Teixeira Duarte Engenharia e Construções, S.A., Fernando S., 1998): Planta de cada piso do edifício e caudais de insuflação de projeto para cada zona;
3. Projetos de arquitetura (Arquitectos Associados, 1995): Perfis e materiais construtivos.

### 6.1. Medições

Mediram-se os caudais reais em cada sala utilizando um anemómetro de molinete (figura 6.1) com funil para cobrir toda a grelha de entrada de ar com o intuito de estudar o estado atual do sistema de AVAC. Como seria muito moroso medir o caudal real em todos os espaços tentou fazer-se uma análise generalizada, medindo apenas algumas salas que permitiram ter uma percepção geral do funcionamento atual do sistema. Para tal mediu-se, caso exista, pelo menos uma sala de aula, um escritório e um gabinete em cada piso de cada bloco do edifício porque são os espaços que serão alvo de uma futura intervenção a sistema de climatização mecânico.



Figura 6.1 – Anemómetro de molinete. Foi ainda aplicado um funil por forma a cobrir toda a área da conduta. VelociCalc® Air Velocity Meter Model 5725. Fonte: (VELOCICALC®, Operation and Service Manual: VELOCICALC® AIR VELOCITY METER MODEL 5725, 2016)

No projeto de arquitetura dos circuitos aeráulicos, o número das salas não são os atuais. Nesse sentido foi necessário verificar *in loco* todas as salas e registar o seu respetivo número na planta. Esta verificação serve ainda para confirmar se a utilização dos espaços é a mesma que em projeto ou se houve alguma alteração. Em muitos casos verificou-se que os espaços definidos como laboratórios servem de escritórios e, nos casos em que existiam hotte's, estas foram retiradas permanentemente ou estão desativadas.

A tabela 6.1 apresenta os caudais de insuflação em cada uma das salas onde se realizaram as medições. É ainda feita uma comparação com os valores de projeto e do RECS. Devido ao elevado número de células decidiu-se identificar a vermelho as células que correspondem aos espaços com um caudal inferior ao de projeto e caudal mínimo do RECS e a verde as células que representam a espaços com um caudal de insuflação superior ao de projeto ou do RECS.

Tabela 6.1: Caudais medidos com anemómetro de funil e respetivos desvios em relação ao caudais de projeto e aos requisitos mínimos do RECS.

Orientação	Sala	Utilização	Caudais de insuflação medidos		Valores de Projeto	Caudal real vs Caudal projeto	Requisitos mínimos RECS	Caudal real vs Caudal RECS
			m <sup>3</sup> /h.m <sup>2</sup>	m <sup>3</sup> /h/ocupante	m <sup>3</sup> /h.m <sup>2</sup>	Desvio (%)	m <sup>3</sup> /h/ocupante	Desvio (%)
SE	8.2.14	Sala de aula (24 pessoas)	5	11	7.2	-31	30	-64
	8.2.19	Sala de aula (40 pessoas)	13	16	7.2	74	30	-46
	8.3.34	Gabinete	Grelha Tapada		4.3	-	35	-
	8.3.37	Gabinete	9	113	4.3	116	35	222
	8.4.16	Gabinete	8	134	4.3	79	35	282
	8.4.28	Gabinete	9	115	4.3	120	35	228
	8.5.34	Gabinete	6	97	4.3	31	35	178
	8.6.13	Gabinete	5	100	4.3	12	35	187
NE	8.1.70	Sala de Refeições (32 pessoas)	3	3	4.3	-24	35	-90
	8.2.42	Gabinete	7	115	4.3	54	35	228
	8.2.50	Gabinete	Grelha Tapada		4.3	-	35	-
	8.2.53	Gabinete	1	13	4.3	-76	35	-64
	8.3.58	Gabinete (2p)	3	28	4.3	-25	35	-20
	8.4.58	Gabinete (2p)	Grelha Tapada		4.3	-	35	-
	8.4.64	Gabinete	7	84	4.3	62	35	141
	8.5.53	Gabinete (2p)	3	52	4.3	-27	35	49
SW	8.5.57	Gabinete (2p)	6	19	4.3	40	35	-45
	8.1.08a	Laboratório (2 pessoas)	16	402	10.8	44	35	1048
	8.1.31	Gabinete	9	108	4.3	108	35	209
	8.1.46	Gabinete	5	75	4.3	10	35	115
	8.2.04	Sala de aula (24 pessoas)	25	33	7.2	242	30	12
	8.2.10	Sala de aula (40 pessoas)	15	20	7.2	111	30	-35
	8.2.22	Sala de estudo/Gabinete 6 pessoas	7	355	4.3	69	35	914
	8.3.05	Gabinete (2p)	6	56	4.3	51	35	61
NW	8.3.21	Gabinete (2p)	10	70	4.3	129	35	99
	8.6.05	Gabinete	5	105	4.3	16	35	199
	8.1.51	Gabinete	5	76	4.3	12	35	118
	8.1.64a	Sala de aula (32 pessoas)	4	5	7.2	-48	30	-82
	8.1.68	Grupo Edifícios	2	90	4.3	-50	35	158
	8.2.27	Gabinete	Grelha Tapada		4.3	-	35	-
	8.2.28	Gabinete	7	112	4.3	64	35	219
	8.3.55	Gabinete (2p)	5	45	4.3	19	35	27
	8.4.37	Gabinete	9	137	4.3	101	35	291
	8.4.51	Gabinete (2p)	6	48	4.3	34	35	36
	8.5.19	Gabinete	7	108	4.3	58	35	209
	8.6.23	Gabinete	3	38	4.3	-38	35	10
	8.6.24	Gabinete	2	21	4.3	-58	35	-40

Na maioria dos casos, sempre que os caudais insuflados nas salas correspondem a valores iguais ou superiores aos valores de projeto, também cumprem os requisitos mínimos do RECS. Contudo existem algumas exceções que se devem à diferença das unidades métricas utilizadas. Como exemplo, no caso da sala 8.2.40 apesar do caudal de insuflação estar bastante acima do valor de projeto, os requisitos mínimos do RECS não são satisfeitos, o que se deve a este último definir o caudal de insuflação mínimo em função do número de ocupantes (foi considerado a ocupação máxima da sala, 40 pessoas). Já na sala 8.1.68 e 8.6.23 sucede-se o inverso, ou seja, não cumpre o caudal definido no projeto. Estas salas têm uma ocupação total muito inferior, sendo neste caso o fator limitante a área da zona. De uma forma geral, os caudais medidos apresentam valores muito diferente que o esperado o que representa um desequilíbrio do sistema.



Outra forma de avaliar se o sistema de AVAC estaria a funcionar como definido em projeto e reforçar o estudo realizado foi o caudal à saída do ventilador de cada UTA. Com o auxílio de um anemómetro de fio quente (figura 6.2) mediu-se diretamente o caudal de insuflação na conduta imediatamente à saída do ventilador. Procurou-se uma secção retilínea pois caso contrário, a deslocação do fluido (ar) poderia ser afetada devido à turbulência do escoamento, anulando a validade das medições. Para fazer o furo utilizou-se um berbequim emprestado pelos serviços técnicos da FCUL. De seguida inseriu-se a ponta do anemómetro de fio quente pelo furo de modo a que esta ficasse aproximadamente no centro do escoamento (centro da conduta). Contudo, as condutas, imediatamente a seguir aos ventiladores apresentavam secções retas muito curtas e de seguida subdividiam-se. As medições foram realizadas no melhor local possível, mas devido a impossibilidades técnicas os resultados poderão ter sido afetados. Na figura 6.3 encontram-se os locais onde foram efectuadas as medições do caudal de ar à saída das UTA's.



Figura 6.2 – Anemómetro de fio quente. VelociCalc® Multi-Function Ventilation Meter 9565. Fonte: (VELOCICALC®, Operation and Service Manual: VELOCICALC® MULTI-FUNCTION VENTILATION METER MODEL 9565, 2016)

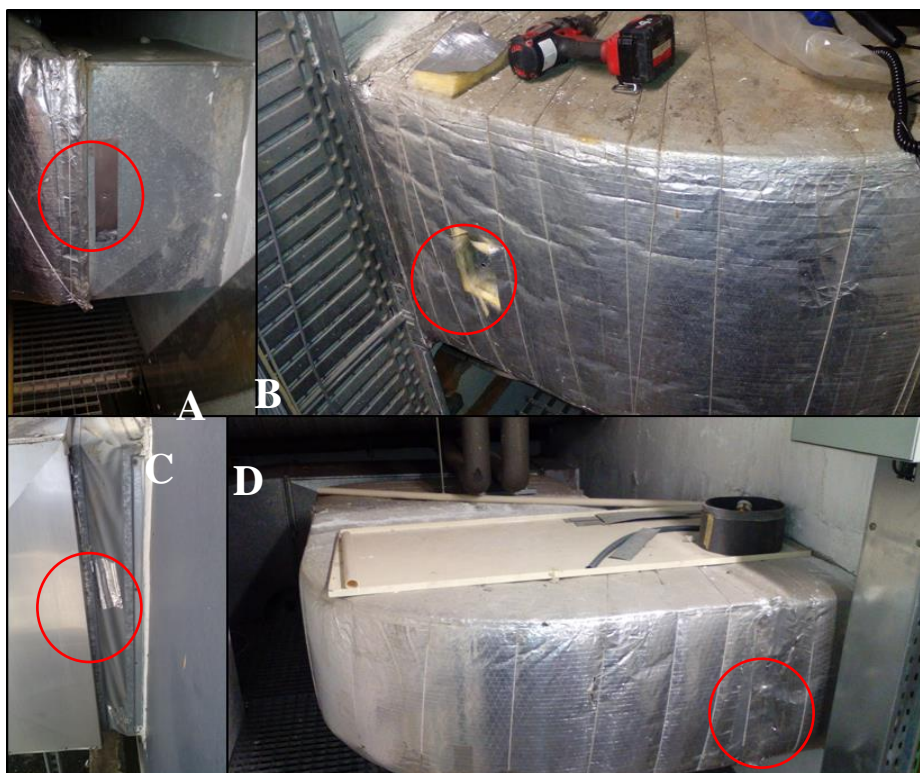


Figura 6.3 – Furos efectuados para mediação dos caudais de ar à saída dos ventiladores das UTA's A, B, C e D.

A tabela 6.2 apresenta os valores do desvio de caudal insuflado verificado à saída dos ventiladores das UTA's em relação ao caudal de insuflação de projeto.

Tabela 6.2 – Desvio entre o caudal de insuflação registado e o caudal de insuflação de projeto.

UTA	Velocidade do ar de insuflação (m/s)	Àrea de secção (m <sup>2</sup> )	Caudal do ar de insuflação (m <sup>3</sup> /h)	Caudal projeto (m <sup>3</sup> /h)	Desvio (m <sup>3</sup> /h)
<b>A</b>	6.8	0.6	13484	14598	-1114
<b>B</b>	5.1	0.6	10118	12636	-2518
<b>C</b>	4.3	1.2	18446	22068	-3622
<b>D</b>	11.7	0.6	23733	19638	4095

Em vários gabinetes constatou-se que os seus ocupantes preferiam ter a grelha de insuflação tapada a ter um caudal insuflado desregulado (em alguns casos muito superior ao definido). Existe ainda algumas manifestações de desagrado quanto aos odores e poeiras, expelidos pelas condutas. Esta situação tem um efeito agravante no sistema, uma vez que o caudal insuflado é constante, sendo assim, no caso de uma grelha estar tapada o ar é obrigatoriamente distribuído por outras zonas.

A partir das observações realizadas determinou-se efetivamente um desequilíbrio no sistema de AVAC, confirmado pelas medições realizadas, nesse sentido, o sistema deverá ser afinado de forma a melhorar o serviço prestado.

## 6.2. Medidas de eficiência energética e poupança esperada

O objetivo principal deste projeto é reduzir o consumo de energia do sistema AVAC. As medidas de eficiência energética passam essencialmente por:

- Reduzir o caudal de insuflação de projeto em 50%;
- Promover a ventilação natural com a introdução de janelas com abertura basculante.

A figura 6.4 apresenta a intervenção que se pretende realizar. À esquerda a representação das janelas que atualmente se encontra no edifício, à direita, o tipo de janela após aplicação das MRCE.

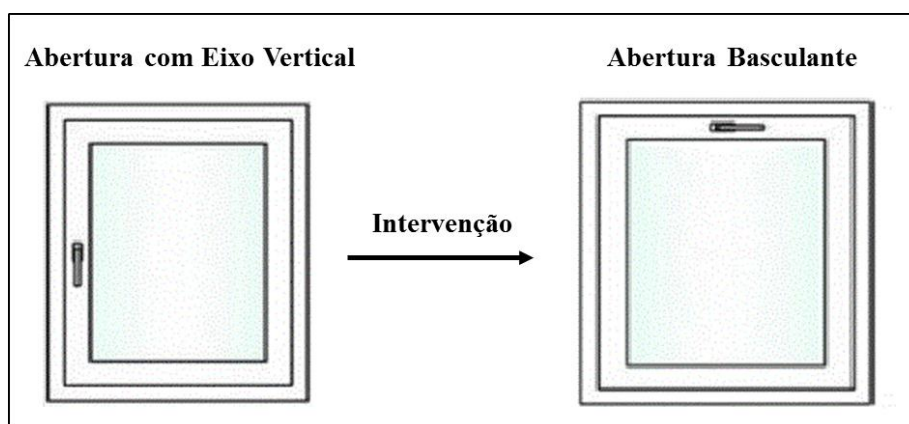


Figura 6.4 – Janela com abertura com eixo vertical (esquerda) e Janela com abertura basculante (direita). Adaptado de: (Catálogo de Arquitetura, 2016)

A redução do caudal de insuflação é justificada com um aumento da ventilação natural que, como referido no capítulo 4, é uma forma de ventilar e climatizar passivamente um espaço sem dispêndio de energia elétrica. A ventilação natural é a solução para o aumento da eficiência energética. Sendo assim, apenas zonas com janelas serão alvo desta intervenção. Contudo, nem todos os espaços com janelas serão intervencionados, sendo este estudo limitado a:

- Salas de aula;
- Escritórios;
- Gabinete.

A restrição das zonas que serão intervencionadas não se limita apenas às zonas que não têm janelas. O mesmo acontece com laboratórios com hottes que ficam fora deste estudo por terem necessidades de renovação de ar distintas e por se tratar de um sistema mais complexo. Também os anfiteatros, biblioteca e bar ficam fora do estudo pois têm sistemas de climatização próprios. Na figura 6.4 estão representadas o número e tipo de zona onde serão aplicadas as MRCE.

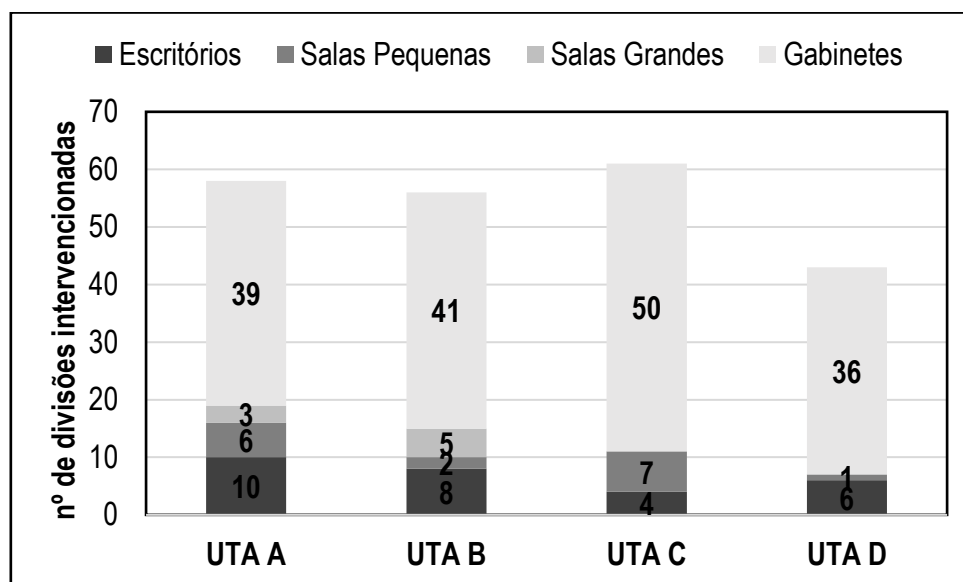


Figura 6.5 - Número de salas intervencionados para cada bloco do edifício.

Como referido anteriormente, por forma a reduzir o caudal de insuflação nestes espaços será promovida a ventilação natural. O eixo de abertura das janelas será alterado por forma a que todos estes espaços tenham janelas do tipo basculante. As intervenções passam maioritariamente por uma mudança do eixo de abertura da janela. Todas as janelas intervencionadas passarão a ser do tipo basculante. Este tipo de janelas permite uma maior frequência de abertura, devido ao seu ângulo de abertura (M. Krzaczek., 2015) (Sebastian Herkel, 2008). Existem, contudo, algumas salas que contêm vidro fixo. Nessas salas terá de ser feita uma janela de raiz o que significa um investimento muito superior em relação às restantes. A tabela 6.3 apresenta as intervenções a fazer em cada bloco de edifício.



Tabela 6.3 - Intervenções para cada bloco do edifício.

Intervenção	nº zonas (SW)	nº zonas (SE)	nº zonas (NW)	nº zonas (NE)	nº zonas Total
Fazer janela basculante	1	2	2	1	6
Mudar eixo de abertura	58	57	59	42	216
Não intervir	42	27	50	29	148

O gráfico 6.5 mostra a redução de caudal esperada após a implementação das medidas de eficiência energética.

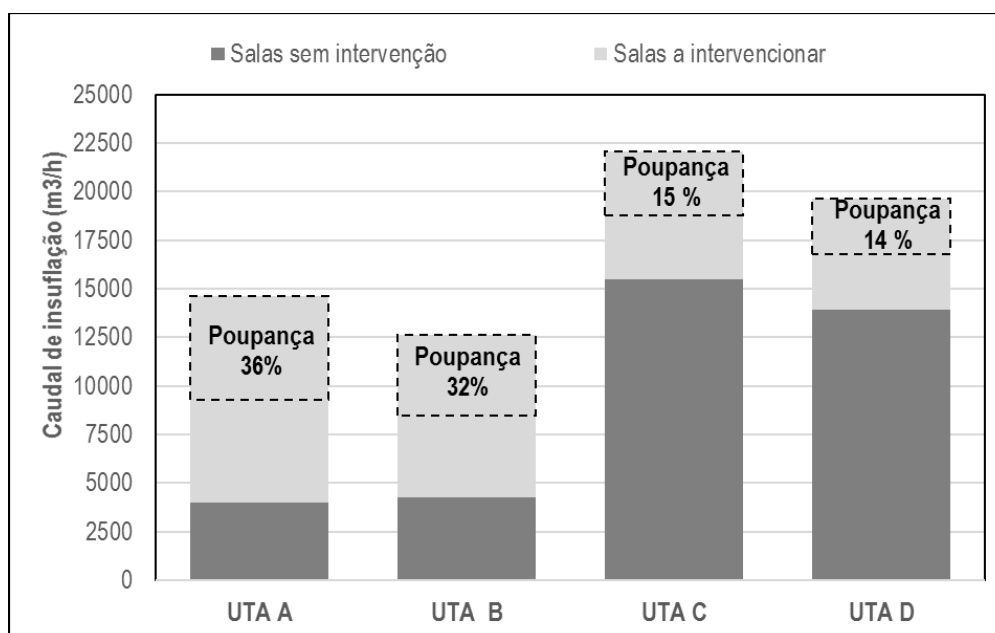


Figura 6.6 – Potencial de poupança total para cada UTA do edifício.

Uma vez que a redução do caudal será de 50%, a poupança máxima possível é efetivamente 50%. Contudo, os valores de poupança são da ordem dos 30% na zona sul (UTA A e B) e bastante mais reduzidos na zona norte (UTA C e D). Esta evidência deve-se ao fato de a zona norte ser maioritariamente ocupada por laboratório de Departamento de Química e Bioquímica (DQB), ou seja, a maioria dos espaços são laboratórios com hottes. Na coluna referente ao caudal das salas sem intervenção é notório que na zona norte estas representam grande parte da totalidade.

Seguidamente avaliou-se o funcionamento atual do sistema AVAC em termos de energia. Para tal, pediu-se aos serviços técnicos da FCUL o acesso a uma das faturas de eletricidade (Anexo II). Através dessa fatura foi possível calcular o valor pago por kWh da forma descrita pela equação 6.1:

$$\frac{\text{Valor a Pagar (€)}}{\text{Energia faturada (kWh)}} = \frac{57789}{427989} = 0,135 \text{ €/kWh} \quad (6.1)$$

A partir do valor obtido através da equação 6.1 e da potência dos quatro ventiladores, estimou-se a eletricidade anual necessária para funcionamento dos mesmos:

$$\text{Consumo de eletricidade}^7 = \text{Potência} \times \text{tempo de funcionamento anual} = (5,5 + 5,5 + 9 + 9) \times 13 \left( (365 - 14 - 10) \times \frac{5}{7} \right) = 91826 \text{ kWh} \quad (6.2)$$

Com os resultados das equações 6.1 e 6.2 determinou-se o custo da eletricidade anual dos ventiladores. A tabela 6.4 contém além do custo da eletricidade anual, a poupança monetária alcançada com base na redução do caudal insuflado.

Tabela 6.4 – Custo da eletricidade para funcionamento dos ventiladores e poupança esperada.

Projeto		Após intervenção		Poupança	Poupança
Custo da eletricidade (€/ano)	Caudal total (m3/h)	Custo da energia (€/ano)	Caudal total após intervenção (m3/h)	(€/ano)	(%)
12397	68940	9835	54693	2562	20.7

<sup>7</sup> As UTA's e consequentemente os ventiladores apenas estão em funcionamento entre as 7h e as 20h dos dias semanais. Durante os fins-de-semana, feriados e férias estão desligados.

## Capítulo 7 – Implementação das medidas de eficiência energética

Ao longo deste capítulo serão apresentados os processos realizados no modelo de simulação dinâmica computacional por forma a simular da forma mais fidedigna todos os cenários analisados. Pretende-se demonstrar o potencial da poupança energética do sistema de AVAC do edifício C8 FCUL com a introdução de melhores condições de ventilação natural. O uso regular de ventilação natural reduz a importância dos sistemas mecânicos, permitindo a redução do caudal de insuflação. Em todos os casos intervencionados as condições impostas pelo RECS são cumpridas.

### 7.1. Metodologia – Simulação Dinâmica Computacional

Este capítulo assume a função demonstrar a metodologia adotada desde o início do trabalho realizado até aos resultados finais. Serão referidas e justificadas as tarefas realizadas que permitiram obter os resultados finais. Foram simulados quatro modelos que representam os quatro tipos de espaços a intervencionar. Começou por se construir os modelos geométricos através do *Sketchup* e do plugin *OpenStudio*. Os modelos geométricos representam quatro zonas térmicas isoladas que são os exemplos típicos de salas de aula pequenas, salas de aula grandes, gabinetes e escritórios do edifício.

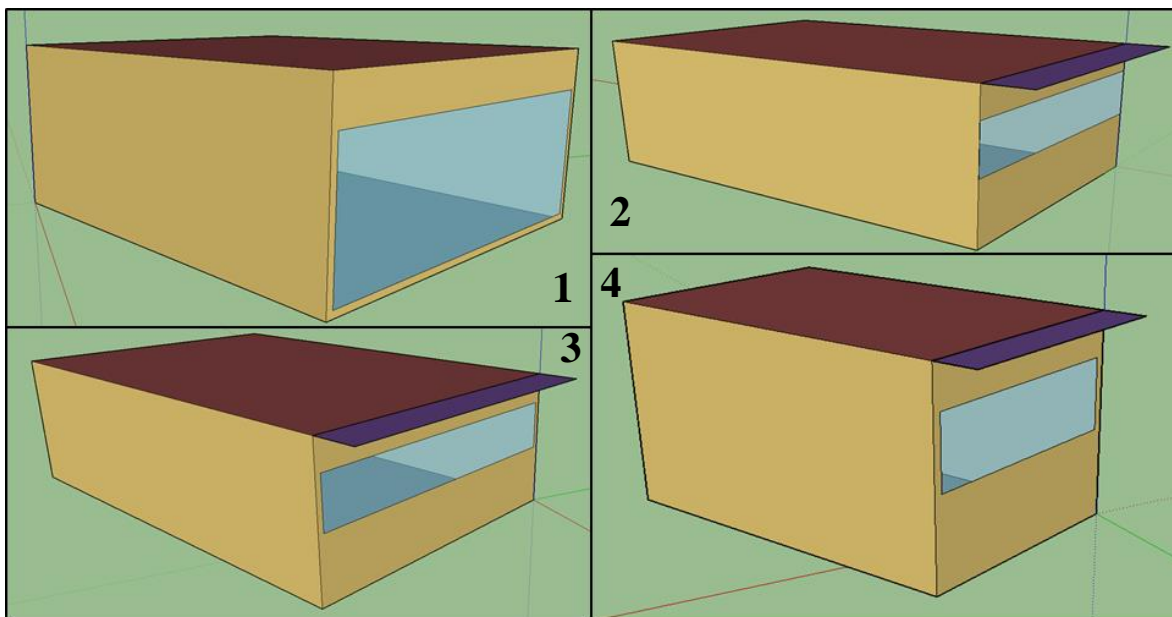


Figura 7.1 – Modelos geométricos dos quatro espaços estudados. 1 – Sala de aula pequena; 2 - sala de aula grande; 3 – Escritório; 4 – Gabinete.

Os passos que seguidamente serão apresentados têm como objetivo o cálculo dos seguintes parâmetros para os quatros espaços referido:

1. Temperatura interior;
2. Renovações de ar;
3. Concentração de CO<sub>2</sub>;
4. Energia consumida para aquecimento e arrefecimento.

Com o objetivo de reduzir o consumo de energia nestes espaços foram definidas duas medidas de eficiência energética. As medidas foram aplicadas a salas de aula, gabinetes e escritórios onde existem janelas. Nestas salas o caudal de insuflação será reduzido em 50 % e será promovida a ventilação natural através da alteração do eixo de abertura das janelas. As janelas têm atualmente um eixo de abertura vertical, que se torna desconfortável para os ocupantes quando a entrada de ar é muito sentida (M. Krzaczek, 2015). Para evitar o desconforto por parte dos ocupantes e maximizar a utilização de ventilação natural, todas as janelas passarão a ser do tipo basculante.

Cada sala foi replicada duas vezes:

- Cenário 1: Caudal de insuflação de projeto, sem tirar proveito de ventilação natural;
- Cenário 2: 50 % Caudal de insuflação de projeto, com aproveitamento da ventilação natural.

Esta redução de caudal será obtida com recurso à instalação VV's nos ventiladores da UTA's. Para que o cenário 2 seja viável do ponto de visto de conforto térmico e da qualidade do ar interior é necessário que a temperatura interior esteja compreendida entre 20 e 25°C e a média corrida da concentração de CO<sub>2</sub> das últimas 8 horas não poderá exceder os 1625 ppm. Este limite máximo de concentração corresponde a uma concentração de 1250 ppm com uma margem de tolerância de 30% (Ministérios do Ambiente, Ordenamento do Território e Energia e da Solidariedade, Emprego e Segurança Social, 4 de Dezembro de 2013).

Estes dois cenários foram avaliados de forma precisa e rigorosa para uma validade anual, para dois dias e duas semanas representativas: um dia/semana frio, um dia/semana quente. Estes dias/semanas representam o pior caso possível para utilização de ventilação natural porque são dias onde as condições exteriores se encontram mais afastadas do intervalo de conforto térmico. Assim se for possível manter as temperaturas interiores e a concentração de CO<sub>2</sub> dentro dos limites impostos durante estes dias/semanas, nos restantes dias do ano a temperatura interior e a qualidade do ar também estarão nos limites impostos.

Não existem zonas nem espaços estanques, todos os espaços estão sujeitos a infiltrações de ar exterior, que varia consoante a envolvente e a diferença de pressões entre o interior e o exterior. Tendo em conta as imperfeições de construções, possíveis frestas por desgaste dos materiais construtivos, considerou-se o valor de 1 renovações por hora (RPH). Este valor teve ainda em conta o fato destes espaços estarem grande parte do tempo (ocupado) com a porta de entrada/saída aberta, dificultando uma quantificação exata. Os gabinetes são a exceção, sendo espaços mais privados, têm geralmente a porta de entrada/saída fechada tendo-se tomado o valor de 0.2 RPH (Berge, 2011).

Os espaços considerados representam parcelas isoladas do edifício. Contudo, existem sempre trocas de calor devido à interação com o restante edifício, sendo necessário definir as condições de fronteira para cada uma das superfícies modeladas. As condições de fronteira relativas às superfícies de um espaço determinam a taxa da transferência de calor entre o interior e o exterior de uma zona térmica. As faces em contacto com o exterior estão sujeitas as condições definidas no ficheiro climático usado como a radiação, temperatura, humidade, radiação, etc. Considerou-se que nenhuma das superfícies se encontra em contacto com o solo, uma vez que foram simulados espaços isolados do edifício onde o pavimento de cada um desses espaços é o teto do espaço que se encontra no piso inferior.

Tabela 7.1 – Condições de fronteira.

<b>Sala de aula (Pequena)</b>	<b>Superfície</b>	Parede este	Parede oeste	Parede Norte (Fachada)	Parede Sul (corredor)	Chão	Teto
	<b>Condição de fronteira</b>	Parede oeste	Parede este	Exterior	Adiabática	Teto	Chão
<b>Sala de aula (Grande)</b>	<b>Superfície</b>	Parede este	Parede oeste	Parede Norte (corredor)	Parede Sul (Fachada)	Chão	Teto
	<b>Condição de fronteira</b>	Parede oeste (corredor)	Parede este (Fachada)	Adiabática	Exterior	Teto	Chão
<b>Gabinete</b>	<b>Superfície</b>	Adiabática	Exterior	Parede Norte	Parede Sul	Chão	Teto
	<b>Condição de fronteira</b>	Parede oeste	Parede este	Parede Sul	Parede Norte	Teto	Chão
<b>Laboratório</b>	<b>Superfície</b>	Parede este	Parede oeste	Parede Norte (corredor)	Parede Sul (Fachada)	Chão	Teto
	<b>Condição de fronteira</b>	Parede oeste (corredor)	Parede este (Fachada)	Adiabática	Exterior	Teto	Chão

### 7.1.1. Considerações da simulação dinâmica computacional

De seguida é feita a descrição dos parâmetros mais relevantes utilizados no Energy Plus.

#### Distribuição Solar

Este parâmetro designa o modo como o *EnergyPlus* distribui a radiação solar que incide no interior através das janelas. Existem cinco opções: “*MinimalShadowing*”, “*FullExterior*”, “*FullInteriorAndExterior*”, “*FullExteriorWithReflections*” e “*FullInteriorAndExteriorWithReflections*”.

A opção utilizada foi a “*FullInteriorAndExterior*”. Considerou-se ser a opção mais válida para o caso em estudo uma vez que tem em conta a radiação incidente no exterior do edifício, mas também em todas as superfícies interiores, por projeção dos raios solares que atravessam a janela e por se tratarem de zonas convexas. Esta escolha também permite contabilizar a parte da radiação incidente que é absorvida, transmitida ou refletida por cada superfície.

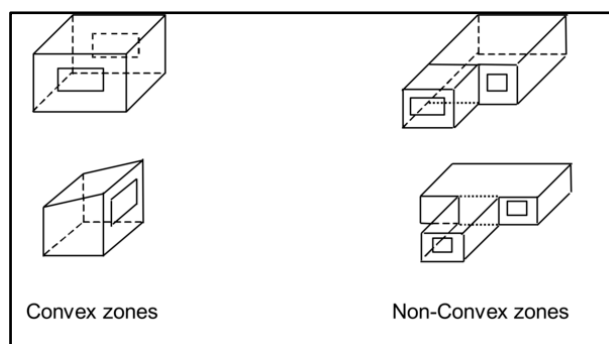


Figura 7.2 - Exemplo de zonas convexas e não convexas.

## Localização & Clima

As coordenadas geográficas do edifício encontram-se no capítulo 5.1. Para simular as condições climáticas no *EnergyPlus* é necessário um ficheiro climático. Estes ficheiros são designados EPW (*EnergyPlusWeather*) e contêm dados meteorológicos como a temperatura de bolbo seco, humidade relativa, radiação global horizontal, velocidade e direcção do vento. Foi utilizado o ficheiro climático para a zona de Lisboa disponibilizado pelo LNEG (LNEG - Laboratório Nacional de Energia e Geologia).

## Período de simulação

A simulação foi efetuada com um período anual e, só posteriormente foram seleccionados os dias e semanas que teriam maior conveniência para o âmbito do trabalho, neste caso, os piores cenários, ou seja, os dias e semanas mais quentes e mais frias. Foram ainda considerados todos os feriados nacionais do ano de 2016 e um período de férias que corresponde às duas semanas intermédias de agosto (de dia 14 até dia 27).

## Modelação dos dados do vento do ficheiro climático

Os dados do ficheiro climático são obtidos por uma estação meteorológica situada numa área próxima ao aeroporto de Lisboa que é caracterizada por ser uma zona bastante plana e desprovida de obstruções. Como referido no capítulo 4, o comportamento do vento não é igual em todas as regiões e é influenciado pela rugosidade do terreno. Contrariamente à estação meteorológica, a FCUL encontra-se numa região fortemente urbanizada. Por forma a modelar os dados do vento registados pelo ficheiro climático utilizaram-se os seguintes comandos:

- *Site:HeightVariation* – Especifica as condições em que os dados do *WeatherFile* foram medidos, ou seja, as condições em que se encontra a *WeatherStation*.
- *Site:WeatherStation* - Especificar as propriedades atmosféricas do local onde se encontra o edifício em estudo.

Nas tabelas 7.2 e 7.3 encontram-se os dados introduzidos em cada um dos comandos anteriores.

Tabela 7.2 – Dados introduzidos no comando “Site: WeatherStation”, (ENERGYPLUS™, 2013) (ASHRAE, 2005)

Site: WeatherStation	
Altura do Sensor de vento (m)	10
Expoente do perfil de velocidade do vento	0.14
Espessura da camada do perfil de velocidade de vento (m)	270
Altura do sensor de temperatura do ar (m)	1.5

Tabela 7.3 – Dados introduzidos no comando “Site:WeatherStation” [35]

Site: HeightVariation	
Expoente do perfil de velocidade do vento	0.33
Espessura da camada do perfil de velocidade de vento (m)	460
Gradiente do coeficiente de temperatura do ar (K/m)	0.0065

### Ocupação e ganhos internos

Os ganhos internos utilizados na simulação dinâmica estão subdivididos em: ocupação e iluminação. Os equipamentos elétricos não foram avaliados devido à sua imprevisibilidade. Contudo, estes poderiam acrescentar o ganho significativo, principalmente nos gabinetes por serem espaços mais reduzidos e onde os ganhos internos são menores.

Nas salas de aula, gabinetes e escritórios, os ocupantes estão de um modo geral sentados e a escrever que corresponde a um nível de atividade de 108 W (EnergyPlus, 2010). Para os ocupantes foi considerada uma fração radiante de 0,55 e uma fração de calor de calor sensível de 0,725 (EnergyPlus, 2010) ( Engineering Tool Box). A taxa de geração de CO<sub>2</sub> foi de  $4,63 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{W}$  (X. Liu, 2013).

As cargas internas derivadas da ocupação dos espaços foram caracterizadas recorrendo à análise feita durante a medição dos caudais de insuflação em cada uma das salas. Nos gabinete e escritórios foi registado o número de ocupantes e posteriormente fez-se uma média dos ocupantes para cada tipo de espaço. Constatou-se que a maioria dos gabinetes são individuais enquanto nos escritórios a ocupação máxima média ronda as 5 pessoas. A ocupação dos espaços de trabalho é também influenciada por múltiplos fatores, apresentando um perfil médio semelhante ao da figura 7.3 (Jie Zhao, 2014).

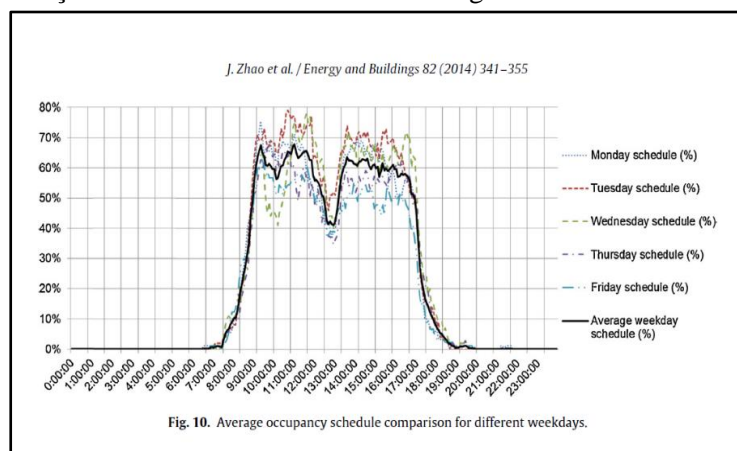


Figura 7.3 - Ocupação média dos locais de trabalho (Jie Zhao, 2014).

Pela análise da figura anterior conclui-se que a ocupação média máxima ronda os 65% entre as 9h e as 18h enquanto na hora de almoço (13-14 h) a ocupação ronda os 40%. Consequentemente, nos laboratórios considerou-se uma ocupação de 65% entre as 9h e as 13h e entre as 14h e as 18h sendo que entre as 13h e as 14h a ocupação é de 40%. Quanto aos gabinetes como são individuais considerou-se uma ocupação de 100% entre as 9h e as 13h e entre as 14h e as 18h sendo que entre as 13h e as 14h a ocupação é de 0%.

A ocupação das salas de aula apresenta um perfil médio semelhante ao da figura 7.4 (James A. Davis, 2010). Segundo o perfil de ocupação da figura 7.4 a ocupação média máximo ronda as 60%, sendo esse o valor de ocupação considerado para as salas de aula. Por forma a aferir com a maior precisão possível o horário de ocupação das salas de aulas, foi realizada uma consulta aos horários reais do ano lectivo 2016/2017 de cada uma das salas. Contudo, os horários entre salas e entre semestre são bastante dispares dificultando o cálculo de uma média. Por forma a contornar esta dificuldade e tornar o horário mais realista considerou-se que existem duas aulas de manhã (9h-10h30 e 11h-12h30) e duas aulas à tarde (15h-16h30 e 17-18h30).

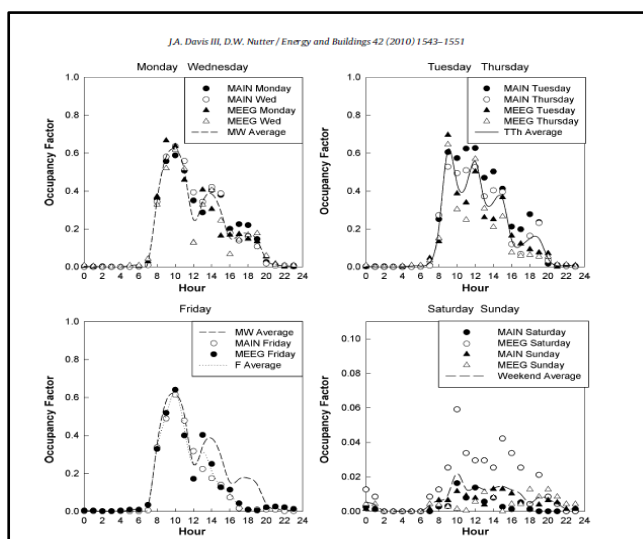


Figura 7.4 - Ocupação média das salas de aula [69].

Nas cargas internas de iluminação definiu-se que cada espaço cumpre os níveis de iluminação recomendados (Benya, 2001). Para tal, cada um dos espaços tem obrigatoriamente 500 lux na área de trabalho o que corresponde a  $5,75 \text{ W/m}^2$ <sup>8</sup>.

A tabela 7.4 descreve as frações relativas aos ganhos internos derivados do sistema de iluminação (ENERGYPLUS™, 2013). Algumas das propriedades da seguinte tabela podem ser verificadas no Anexo III.

Tabela 7.4 – Propriedades da iluminação inseridas no *EnergyPlus*

Iluminação	
Fração do ar de retorno	0
Fração radiante	0.72
Fração visível	0.18
Controlo da iluminação	1

<sup>8</sup> Considerando lâmpadas tubulares fluorescentes (T8) de 38W com 3300 lux (OSRAM, 2016).



Durante os fins de semana e feriados o sistema de ventilação mecânica está desligada, não existem aulas e, portanto, não existem ganhos internos. O mesmo sucede nas duas semanas intermédias de agosto, uma vez que a faculdade está fechada para férias. O horário de funcionamento de sistema de AVAC encontra-se ligado entre as 7h e as 20h e uma temperatura de insuflação constante de 23°C durante todo o ano.

### **Materias de construção , Vãos envidraçados e Sombreamento**

Como dito anteriormente, para o *EnergyPlus* determina as transferências do calor através da envolvente é necessário conhecer os elementos de construção como a constituição das paredes interiores e exteriores, pavimento, cobertura. As características dos materiais construtivos, vãos envidraçados e sombreamento encontram-se nas tabelas 5.1, 5.2, 5.3, 5.4, 5.5.

### **Ventilação Natural<sup>9</sup>**

O comando ‘ZoneVentilation:WindandStackOpenArea’ foi usado para definir a ventilação natural devido a uma janela. Neste comando há a possibilidade de limitar o uso de ventilação natural entre as temperaturas selecionadas. Existem vários artigos relacionados com as condições para as quais é benéfico o uso de ventilação natural, com algumas conclusões em comum (J.F., 2001) (Nicol JF, 2004) (Warren PR, 1984) (Bourgeois, 2005) (Sebastian Herkel, Towards a model of user behaviour regarding the manual control of windows in office buildings, 2008). Como base em algumas conclusões tiradas destes estudos e da análise feita especificamente para o caso de estudo, determinou-se que as janelas seriam abertas sempre que:

- Verão (abril-outubro) – Temperatura exterior não exceda os 25 °C. Esta foi a única condição exigida nos meses quentes pois a temperatura interior encontra-se tipicamente acima dos 20°C e a temperatura exterior nunca atinge valores abaixo de 10 °C nas horas consideradas. Como a temperatura interior nas horas ocupadas se encontra maioritariamente perto dos 25 °C, não existem vantagens aparentes para o uso de ventilação natural acima deste valor.
- Inverno (novembro-março) – Temperatura exterior superior a 10 °C, com a condição da temperatura interior ser igual ou superior a 20 °C. Não se limitou superiormente a temperatura exterior porque estas nunca passam os 25°C e por isso acima dos 10 °C há sempre condições para o uso de ventilação natural.

O limite inferior (10°C) foi determinado tendo em conta a análise dos artigos anteriormente referidos e por forma a garantir a qualidade do ar interior. Se esse limite fosse mais elevado, a ventilação natural seria insignificante no Inverno e a concentração de CO<sub>2</sub>, principalmente das salas de aula, seria superior ao limite de 1625 ppm. Para efeitos da simulação considerou-se que todas as janelas terão a mesma área de abertura (0,27m<sup>2</sup>/janela). Nas salas grandes a área de abertura é o dobro dos restantes espaços porque existem duas janelas basculantes uma vez que, neste espaço existe maior necessidade de ventilar devido à grande taxa de ocupação. Nos restantes espaços considerou-se que apenas seria feita uma janela basculante.

---

<sup>9</sup> As janelas apenas são abertas durante as horas diurnas (7h-20h). Por questões de segurança as janelas encontram-se fechadas fora das horas de trabalho habituais.

## Ventilação Mecânica e Aquecimento

Por forma a simular o sistema de ventilação mecânica e os radiadores nas salas do edifício C8, foram inseridos outros seis comandos no *EnergyPlus*:

- *HVACTemplate:System:DedicatedOutdoorAir* – Serve simular o ar exterior que é posteriormente filtrado e climatizado nas UTA's. Neste comando foi introduzido o caudal de insuflação total da respetiva zona uma vez que as UTA's são 100% ar novo. Como referido anteriormente, no cenário 2 foi introduzido 50% do caudal total insuflado na zona. Para utilizar este comando é obrigatório um objeto '*HVACTemplate:Zone*'.
- *HVACTemplate:Zone:FanCoil* – Este foi o objeto escolhido para usar o '*HVACTemplate:System:DedicatedOutdoorAir*' porque prevê o funcionamento da unidade de climatização e por dar a possibilidade de inserir em conjunto os radiadores.
- *HVACTemplate:Plant:Chiller* & *HVACTemplate:Plant:ChillerWaterLoop* – Para arrefecimento do ar o sistema AVAC contém elementos de arrefecimento como é o caso de chiller's. Estes dois comandos permitem simular o efeito desses elementos.
- *HVACTemplate:Plant:Boiler* & *HVACTemplate:Plant:HotWaterLoop* – O sistema de AVAC contém também elementos de aquecimento (caldeiras) que são simulados com recurso a estes dois comandos.

## Output's

Por forma a obter os resultados que serão apresentados no capítulo seguinte, foram definidos os seguintes *output's* na simulação: as temperaturas exterior de bolbo seco e interior da zona, a concentração de CO<sub>2</sub>, as renovações de ar por infiltração, ventilação e ventilação mecânica, a contagem dos ocupantes, a energia total de aquecimento e arrefecimento do sistema AVAC, energia de aquecimento dos radiadores. Estes resultados foram obtidos com um *timestep* de 10 minutos.

## Capítulo 8 – Apresentação e discussão de resultados

Este capítulo surge como forma de apresentar os resultados das simulações efetuadas com recurso ao *EnergyPlus*. O capítulo será dividido em cinco partes que representam as quatro salas-tipo analisadas e por fim será feita a análise económica onde serão comparados os custos de investimento para implementação das medidas de eficiência energética com o retorno financeiro anual por redução da fatura energética. Ao longo deste capítulo serão ainda retiradas as conclusões à medida que são mostrados os resultados.

### 8.1. Sala de aula pequena

Seguidamente são apresentados os resultados das simulações para a sala pequena. A sala de aula pequena tem um caudal de insuflação de projeto de 60 l/s o que representa 216 m<sup>3</sup>/h e tendo em conta o seu volume, 91m<sup>3</sup>, representa 2,4 renovações por hora. No cenário 2, visto a insuflação ser metade deste valor, também as RPH são metade, ou seja, 1,2.

#### Cenário 1

Na figura 8.1 encontram-se os gráficos da temperatura interior para um dia frio e para um dia quente, do lado esquerdo, e os gráfico da concentração de CO<sub>2</sub> para os mesmos dias, do lado direito.

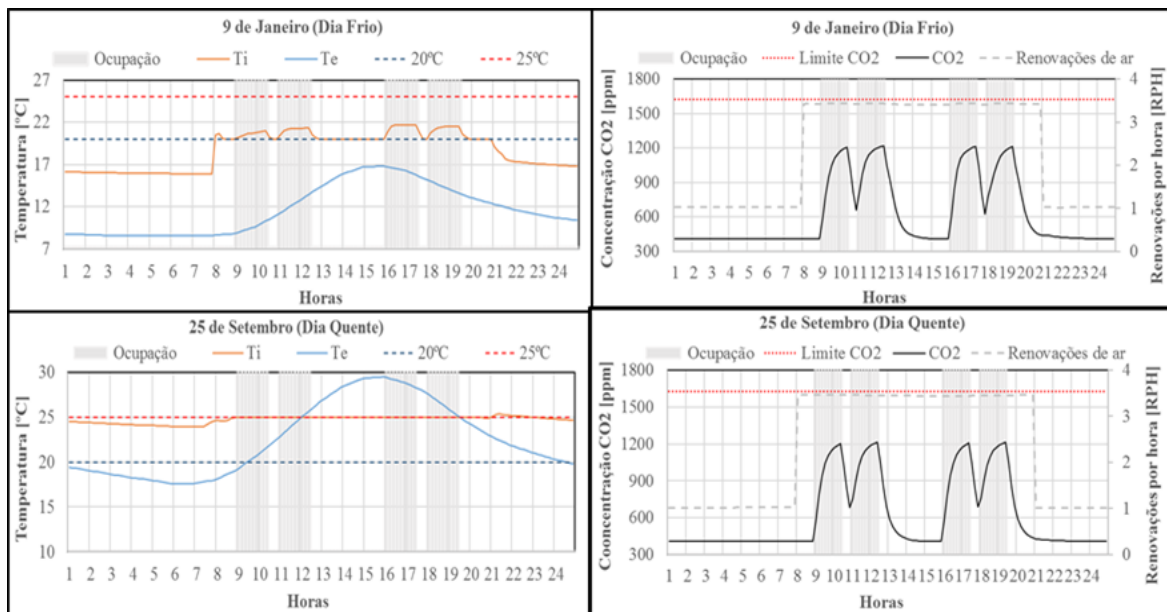


Figura 8.1 - Temperatura interior (esquerda), concentração de CO<sub>2</sub> (direita) para um dia frio e para um dia quente.

Na figura 8.2 encontram-se os gráficos da temperatura interior para uma semana fria e para uma semana quente, do lado esquerdo, e os gráficos da concentração de CO<sub>2</sub> para as mesmas semanas, do lado direito.

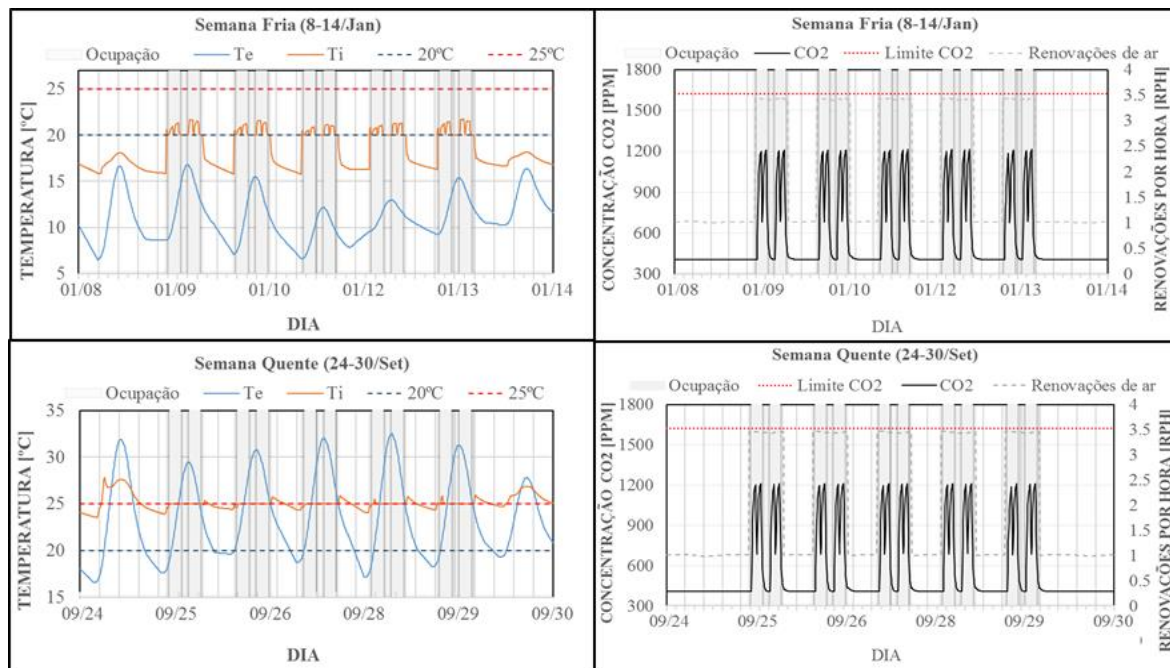


Figura 8.2 - Temperatura interior (esquerda), concentração de CO<sub>2</sub> (direita) para uma semana fria e para uma semana quente.

Os limites de temperatura impostos são cumpridos tanto no dia frio como no dia quente. A análise semanal permite uma visão mais abrangente e onde se pode ver que nos dias frios a temperatura interior ronda os 20°C e nos dias quentes os 25°C. Nas horas ocupadas é visível um ligeiro aumento da temperatura interior que é justificado pelo aumento dos ganhos internos. Nos fins de semana a temperatura interior aproxima-se da temperatura exterior porque a sala encontra-se em *freeflow* uma vez que o sistema de AVAC está desligado.

A concentração de CO<sub>2</sub> também se encontra abaixo do limite do imposto. É durante as horas ocupadas que se verifica a pior qualidade do ar, sendo que a concentra máxima é da ordem das 1200 ppm. As RPH's são iguais tanto nos dias mais frios como nos dias mais quentes porque a insuflação de ar é constante. Por este motivo, e por a sala ter sempre a mesma ocupação (15 pessoas) o perfil de concentração de CO<sub>2</sub> é semelhante em todos os dias. As RPH's constantes durante os fins de semana e durante as horas nocturnas são resultado das infiltrações.

## Cenário 2

Na figura 8.3 encontram-se os gráficos da temperatura interior e do perfil de utilização de ventilação natural para um dia frio e para um dia quente, do lado esquerdo, e os gráficos da concentração de CO<sub>2</sub>, do lado direito.

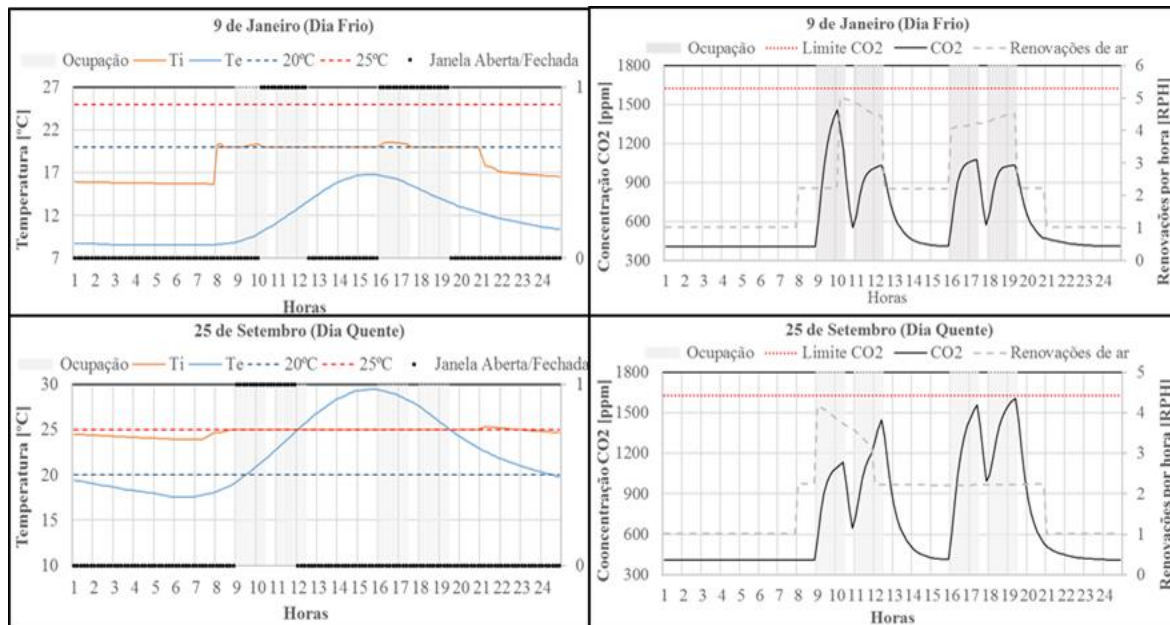


Figura 8.3 - Temperatura interior (esquerda), concentração de CO<sub>2</sub> (direita) para um dia frio e para um dia quente.

Na figura 8.4 encontram-se os gráficos da temperatura interior e do perfil do uso de ventilação natural para uma semana fria e para uma semana quente, do lado esquerdo, e os gráfico da concentração de CO<sub>2</sub>, do lado direito.

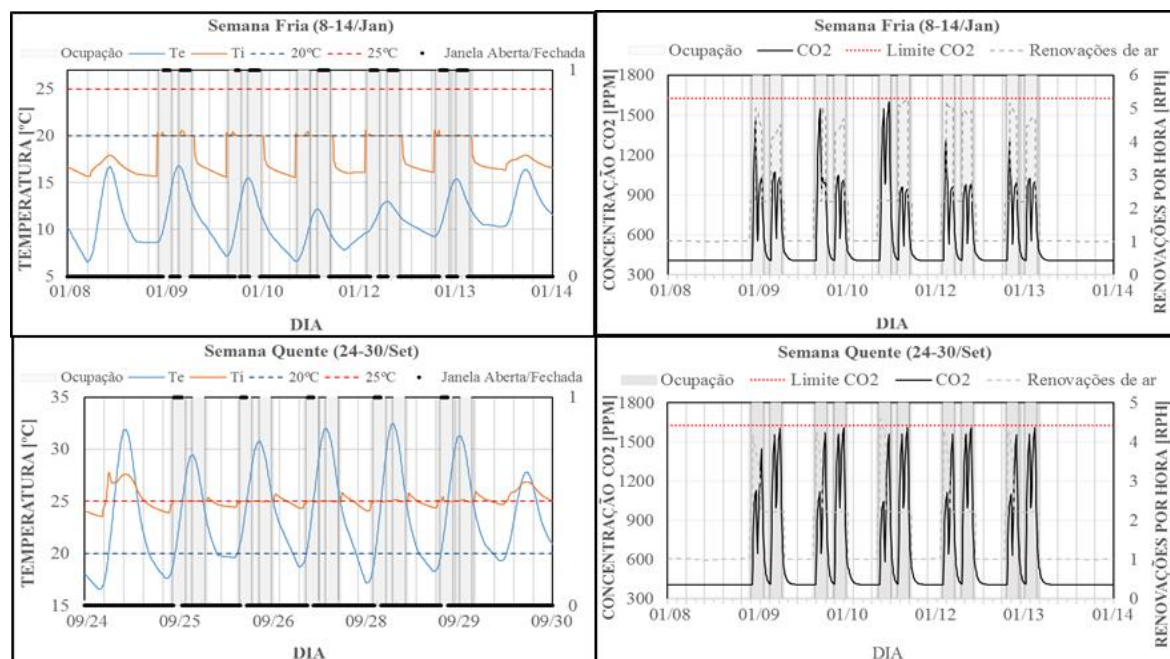


Figura 8.4 - Temperatura interior (esquerda) e concentração de CO<sub>2</sub> (direita) para uma semana fria e para uma semana quente.

Neste segundo cenário é adicionada uma nova variável, a ventilação natural. Nos gráficos à esquerda, referentes à temperatura foi adicionado um eixo secundário para introduzir os momentos em que a janela está aberta. Considerou-se que quando existem condições para o uso de ventilação natural a área de abertura de janela seria total<sup>10</sup>. Quando a ventilação natural não traz benefícios a janela encontra-se totalmente fechada<sup>11</sup>. A temperatura nos dias frio mantém-se perto dos 20°C e nos 25°C nos dias mais quentes. Mais uma vez, nos fins de semana e durante a noite a temperatura interior aproxima-se da temperatura exterior pois o AVAC está desligado.

Contrariamente ao cenário 1, no cenário 2 as renovações de ar são muito variadas o que faz com que a concentração de CO<sub>2</sub> também seja muito variável. Neste caso, as renovações de ar podem ser obtidas por uma combinação de três fatores: infiltração, insuflação de ar pelo sistema AVAC e ventilação natural. Naturalmente quando existe ventilação natural as RPH são superiores e promove a qualidade do ar interior, contudo, concentração máxima de CO<sub>2</sub> está muito próxima de limite permitido pelo RECS, 1625ppm. Este valor é superior ao valor do cenário 1 porque a insuflação de ar do sistema AVAC foi reduzida em 50%, o que reduziu as renovações de ar “constantes” e por vezes não há condições favoráveis para ventilação natural. Contudo, este são os piores cenários possíveis, sendo espectável uma melhor qualidade do ar nos dias mais amenos.

### Resumo dos resultados obtidos

Na figura 8.5 encontram-se os gráficos que comparam o cenário 1 e o cenário 2 em termos de temperatura interior, à esquerda e a concentração interior de CO<sub>2</sub>, à direita. As colunas identificadas com “1” referem-se ao cenário 1, as identificadas com um “2” dizem respeito ao cenário 2.

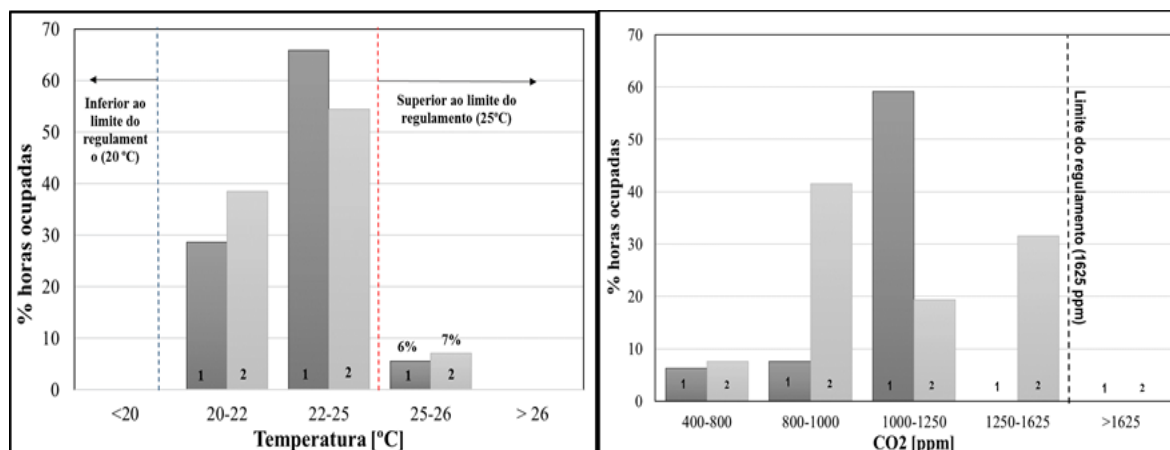


Figura 8.5 - Temperatura interior (esquerda) e concentração de CO<sub>2</sub> (direita) das horas ocupadas. Os valores encontram-se em percentagem de frequência das horas ocupadas que correspondem a cada nível de temperatura/concentração CO<sub>2</sub>.

<sup>10</sup> A área de abertura total é representada por “1” no eixo secundários dos gráficos de temperatura.

<sup>11</sup> A janela totalmente fechada é representada por “0” no eixo secundários dos gráficos de temperatura



Analisando o gráfico de temperatura é perceptível uma grande semelhança entre as temperaturas interiores da sala entre os dois cenários. Em ambos os casos não existem momentos onde a temperatura se encontra abaixo dos 20°C. Dentro dos limites de conforto, o cenário 1 tem mais tendência para apresentar temperatura superior ao cenário 2 embora as diferenças não sejam significativas. Existem, contudo, algumas horas ocupadas em ambos os cenários onde a temperatura superou os 25 °C mas, sempre abaixo dos 26 °C. Estes valores podem ser justificados com os ganhos internos e com o tempo de resposta do sistema de AVAC. Como referido anteriormente, nos dias quentes a temperatura interior encontra-se próxima dos 25°C. Quando os ocupantes entram na sala, há um grande acréscimo dos ganhos internos, que fazem com que a sala aqueça inicialmente. Passado uns minutos os ganhos internos estabilizam e o AVAC consegue responder a esse aumento de temperatura.

No gráfico 8.6, respetivo à concentração de CO<sub>2</sub> na sala, tanto no cenário 1 como no cenário 2, não existe nenhum momento onde as 1625 ppm tenham sido ultrapassadas. Contudo, no cenário 2 em cerca de 30% das horas ocupadas a concentração de CO<sub>2</sub> encontra-se entre 1250-1625 ppm enquanto o cenário 1 tem sempre concentrações inferiores a este nível. Nos momentos em que não há condições de ventilação natural, as renovações de ar do cenário 2 são inferiores às do cenário 1 fazendo com que a qualidade de ar também seja inferior.

## 8.2. Sala de aula grande

Neste capítulo são exibidos os resultados para a sala de aula grande. A sala de aula grande tem um caudal de insuflação de projeto de 100 l/s o que representa 360 m<sup>3</sup>/h e tendo em conta o seu volume, 133m<sup>3</sup>, as renovações por hora devido à ventilação mecânica são 2,7. No cenário 2, visto a insuflação ser metade deste valor, também as RPH são metade, ou seja, 1,35.

### Cenário 1

Na figura 8.6 encontram-se os gráficos da temperatura interior da sala para um dia frio e para um dia quente, do lado esquerdo, e os gráficos da concentração de CO<sub>2</sub> para os mesmos dias, do lado direito.

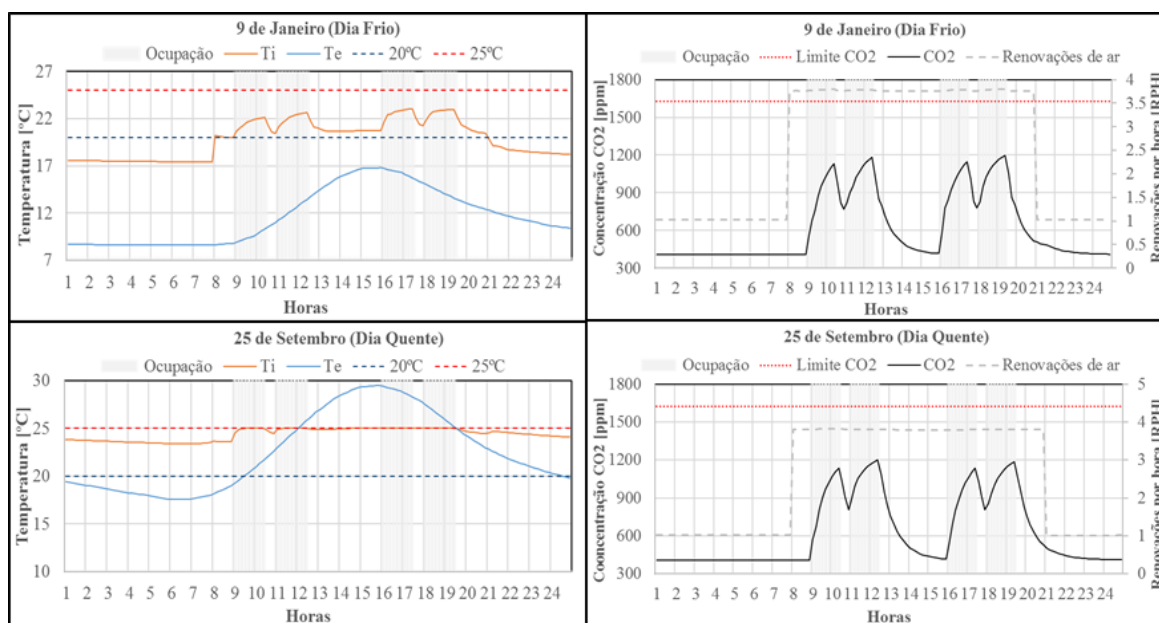


Figura 8.6 - Temperatura interior (esquerda), concentração de CO<sub>2</sub> (direita) para um dia frio e para um dia quente.

Na figura 8.7 encontram-se os gráficos da temperatura interior para uma semana fria e para uma semana quente, do lado esquerdo, e os gráfico da concentração de CO<sub>2</sub> para as mesmas semanas, do lado direito.

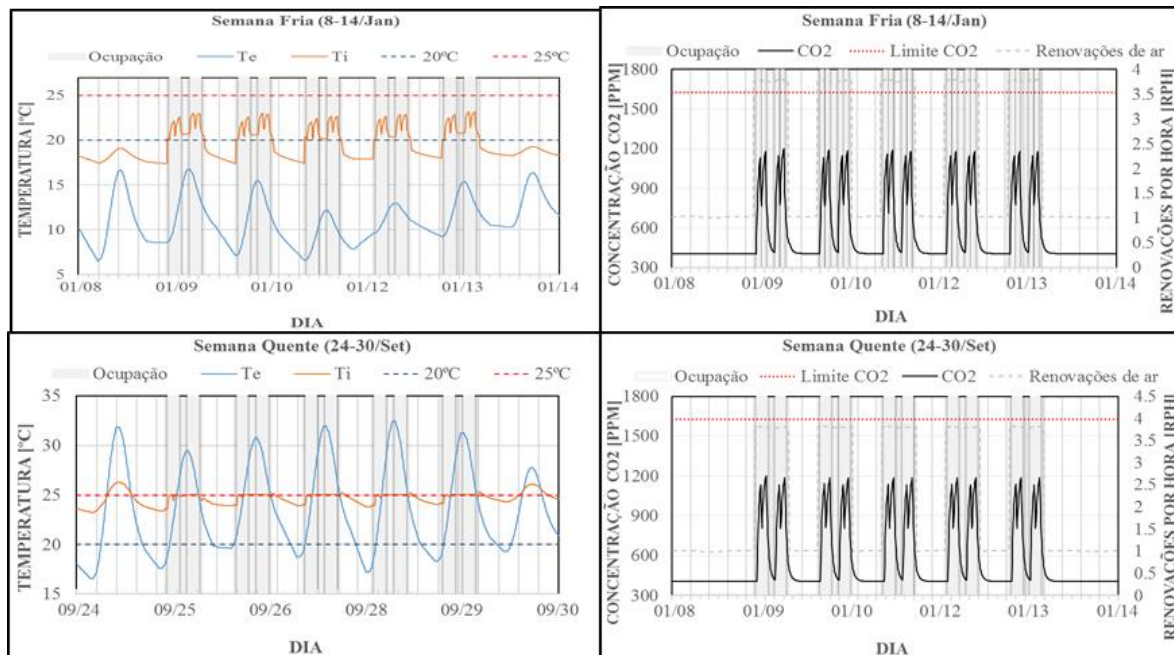


Figura 8.7 - Temperatura interior (esquerda), concentração de CO<sub>2</sub> (direita) para uma semana fria e para uma semana quente.

Pela análise das figura 8.6 e 8.7 pode concluir-se que as condições exigidas de temperatura interior são satisfeitas. Mais uma vez, nos dias mais frios o sistema de climatização tende a manter a temperatura nos 20°C. Existe, contudo, um aumento significativo da temperatura nas horas de aula que se deve aos ganhos internos causados pelos seus 24 ocupantes.

Os gráficos expostos também mostram que a qualidade do ar cumpre os requisitos mínimos quanto à concentração de CO<sub>2</sub>. A maior concentração de CO<sub>2</sub> acontece nas ocupadas e toma o valor de aproximadamente 1200 ppm.



## Cenário 2

Na figura 8.8 encontram-se os gráficos da temperatura interior e perfil de utilização de ventilação natural para um dia frio e para um dia quente, do lado esquerdo, e os gráfico da concentração de CO<sub>2</sub>, do lado direito.

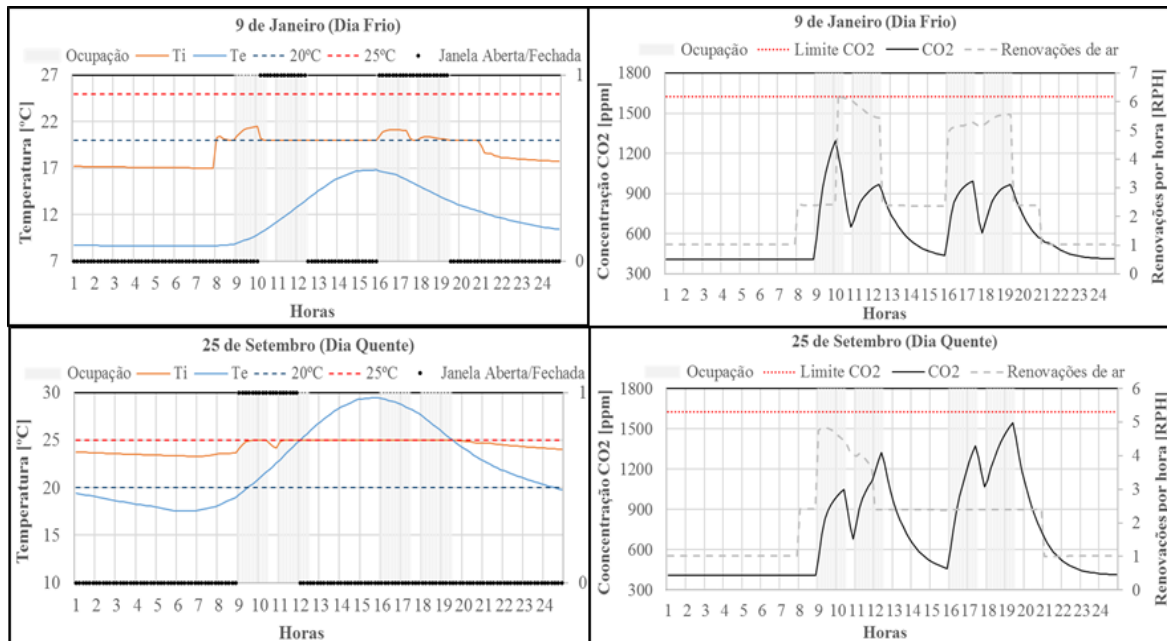


Figura 8.8 - Temperatura interior (esquerda), concentração de CO<sub>2</sub> (direita) para um dia frio e para um dia quente.

Na figura 8.9 encontram-se os gráficos da temperatura interior e do perfil do uso de ventilação natural para uma semana fria e para uma semana quente, do lado esquerdo, e os gráficos da concentração de CO<sub>2</sub>, do lado direito.

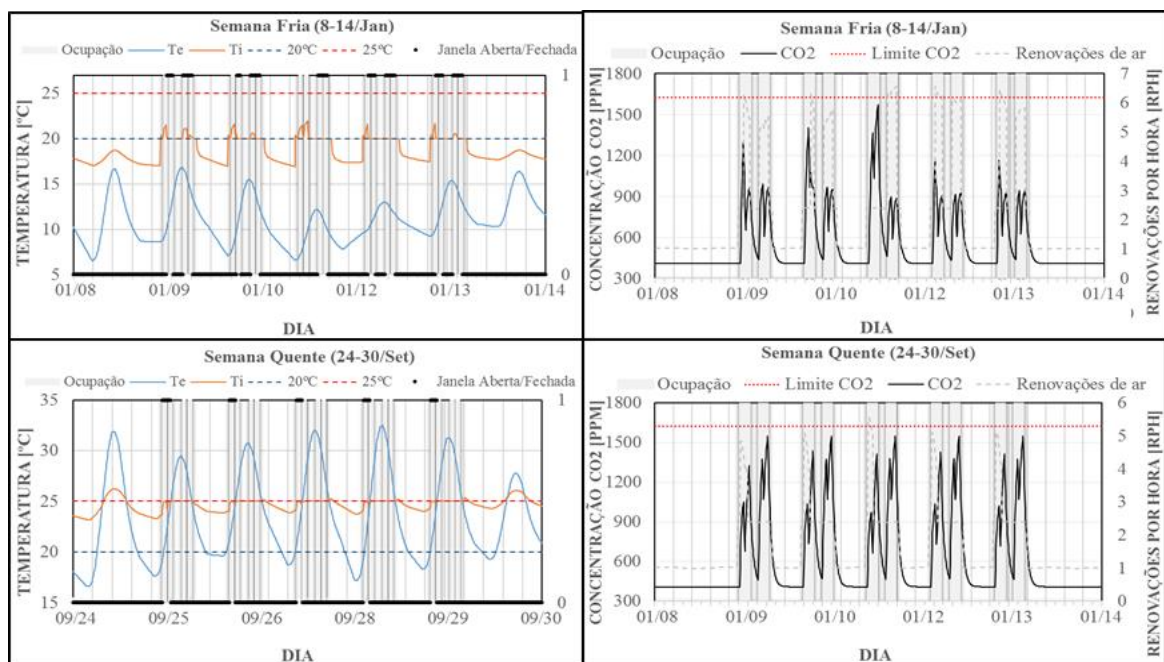


Figura 8.9 - Temperatura interior (esquerda), concentração de CO<sub>2</sub> (direita) para uma semana fria e para uma semana quente.

Da mesma forma que o cenário 1, também no cenário 2 a temperatura interior encontra-se dentro dos limites do RECS. Neste caso os efeitos no aumento da temperatura dos ganhos internos são minimizados com a ventilação natural, pelo que não é registado um aumento tão significativo da temperatura nas horas ocupadas porque se considerou a que a partir dos 10° C no exterior se utilizaria ventilação natural, quando as janelas estão abertas a sala perde calor. No Verão a perda de energia interior não é tão evidente, contudo, também acontece visto se ter considerado que as janelas só abrem até ao limite máximo de 25°C no exterior. Outra observação comum às duas salas de aula é o maior potencial da ventilação natural no inverno devido ao *range* de temperaturas considerado. Nas tardes de verão a temperatura exterior é tipicamente superior a 25°C, não sendo justificável a abertura das janelas.

A concentração de CO<sub>2</sub> apresenta valores semelhantes aos obtidos no cenário 2 da sala de aula pequena, pelas situações justificadas anteriormente.

### Resumo dos resultados obtidos

Na figura 8.10 encontram-se os gráficos que comparam o cenário 1 e o cenário 2 em termos de temperatura interior, à esquerda, e da concentração interior de CO<sub>2</sub>, à direita. As colunas identificadas com “1” referem-se ao cenário 1, as identificadas com um “2” dizem respeito ao cenário 2.

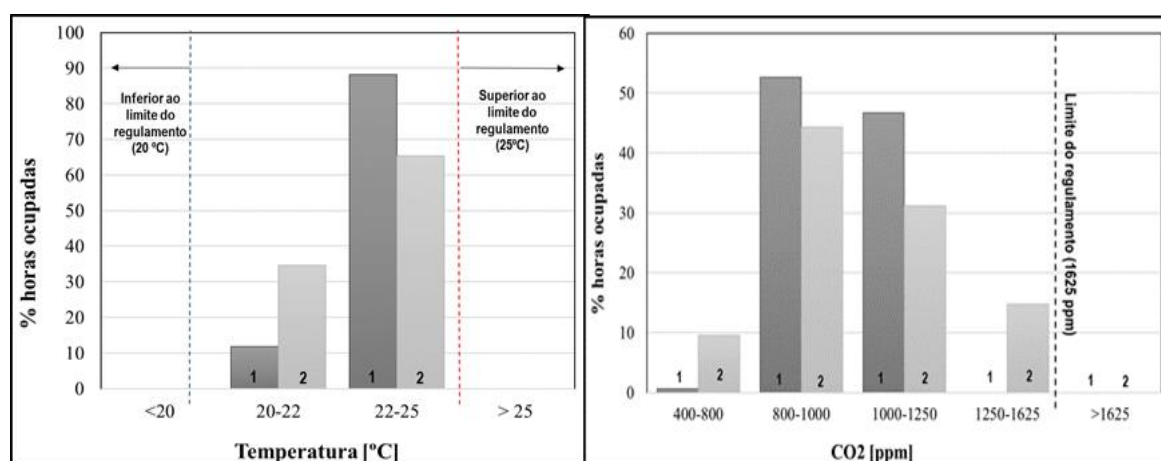


Figura 8.10 - Temperatura interior (esquerda) e concentração de CO<sub>2</sub> (direita) das horas ocupadas. Os valores encontram-se em percentagem de frequência das horas ocupadas que correspondem a cada nível de temperatura/concentração CO<sub>2</sub>.

O gráfico que resume o comportamento da temperatura interior da sala confirma que não existe qualquer hora ocupada em que a temperatura da sala se encontra fora do *range* 20-25°C. A maior parte das horas ocupadas encontra no intervalo 22-25 °C e o cenário 2 tende a ser, de um modo geral, mais fresco que o cenário 1 devido à capacidade de perder calor anteriormente referido.

A concentração de CO<sub>2</sub> também está sempre abaixo do limite do regulamento o que comprova a validade da solução tomada (cenário 2). As concentrações encontram-se essencialmente entre 800 e 1250 ppm. Ao contrário do cenário 1, no cenário 2, há algumas horas entre 1250 e 1625 ppm. Este valores correspondem aos momentos em que não há condições para o uso de ventilação natural.

### 8.3. Escritório

Neste terceiro sub-capítulo surge no seguimento dos resultados obtidos com base na simulação dinâmica computacional para os escritórios. O laboratório tem um caudal de insuflação de projeto de 110 l/s o que representa 396 m<sup>3</sup>/h e tendo em conta o seu volume, 133m<sup>3</sup>, representa 3 renovações por hora. No cenário 2, visto a insuflação ser metade deste valor, também as RPH são metade, ou seja, 1,5.

#### Cenário 1

Na figura 8.11 encontram-se os gráficos da temperatura interior e perfil de utilização de ventilação natural para um dia frio e para um dia quente, do lado esquerdo, e os gráfico da concentração de CO<sub>2</sub>, do lado direito.

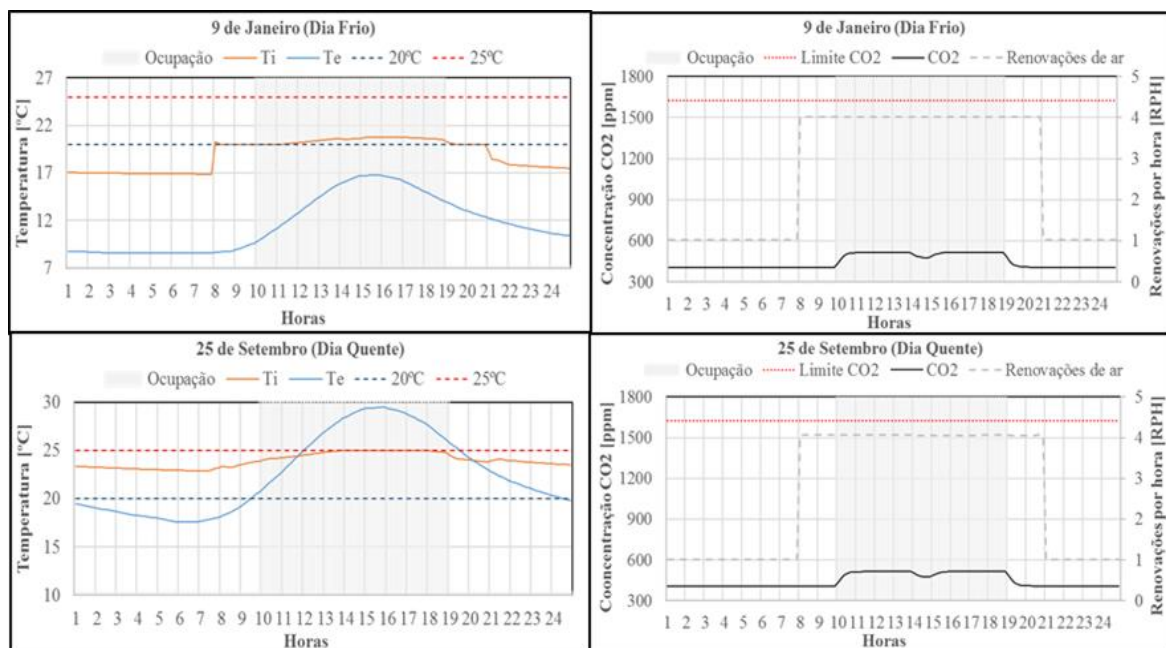


Figura 8.11 - Temperatura interior (esquerda), concentração de CO<sub>2</sub> (direita) para um dia frio e para um dia quente.

Na figura 8.12 encontram-se os gráficos da temperatura interior e do perfil do uso de ventilação natural para uma semana fria e para uma semana quente, do lado esquerdo, e os gráfico da concentração de CO<sub>2</sub>, do lado direito.

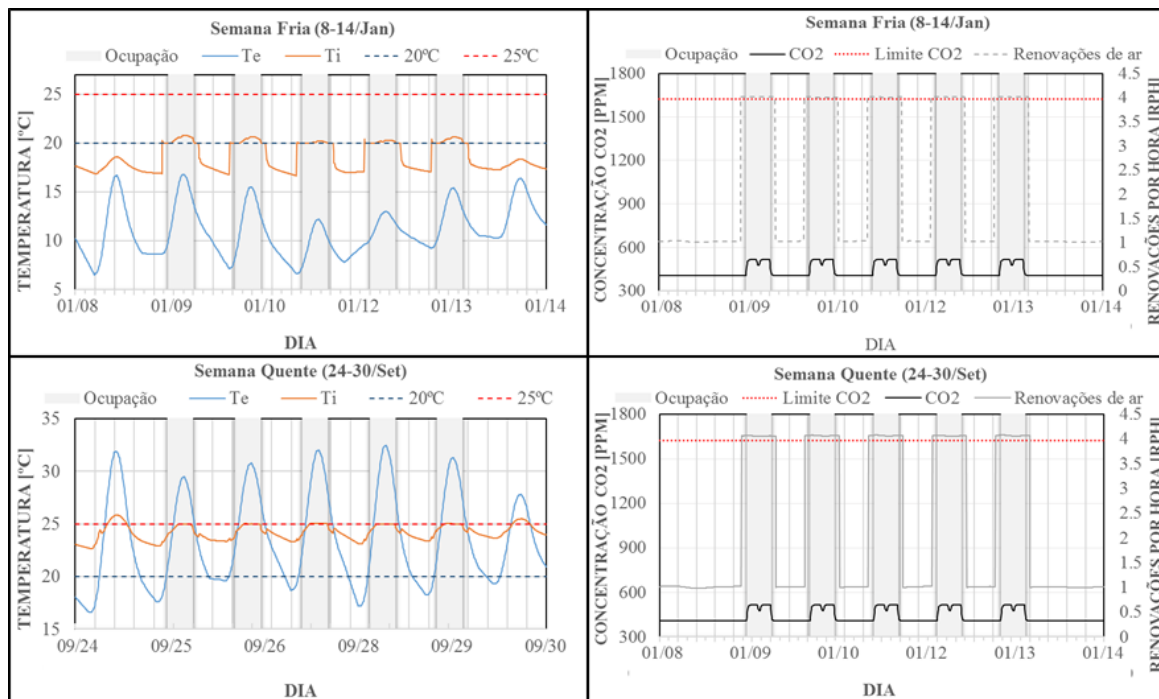


Figura 8.12 - Temperatura interior (esquerda), concentração de CO<sub>2</sub> (direita) para uma semana fria e para uma semana quente.

O escritório é um espaço com uma ocupação bastante diferente de uma sala de aula, assim, como seria de esperar, também os resultados são bastante díspares. Como referido anteriormente este espaço era anteriormente um laboratório onde não havia hotte e que atualmente tem assumido a função de escritório. É portanto um espaço com uma ocupação muito mais reduzida mas com uma área e um caudal de insuflação equivalente à sala de aula grande. Por esta razão, o sistema de AVAC é capaz de manter a temperatura interior e a concentração de CO<sub>2</sub> dentro dos limites dos regulamentos. Contudo, está sobredimensionado e existe grande potencial de redução do consumo de energia nos espaços com esta tipologia.

## Cenário 2

Na figura 8.13 encontram-se os gráficos da temperatura interior e perfil de utilização de ventilação natural para um dia frio e para um dia quente, do lado esquerdo, e os gráfico da concentração de CO<sub>2</sub>, do lado direito.

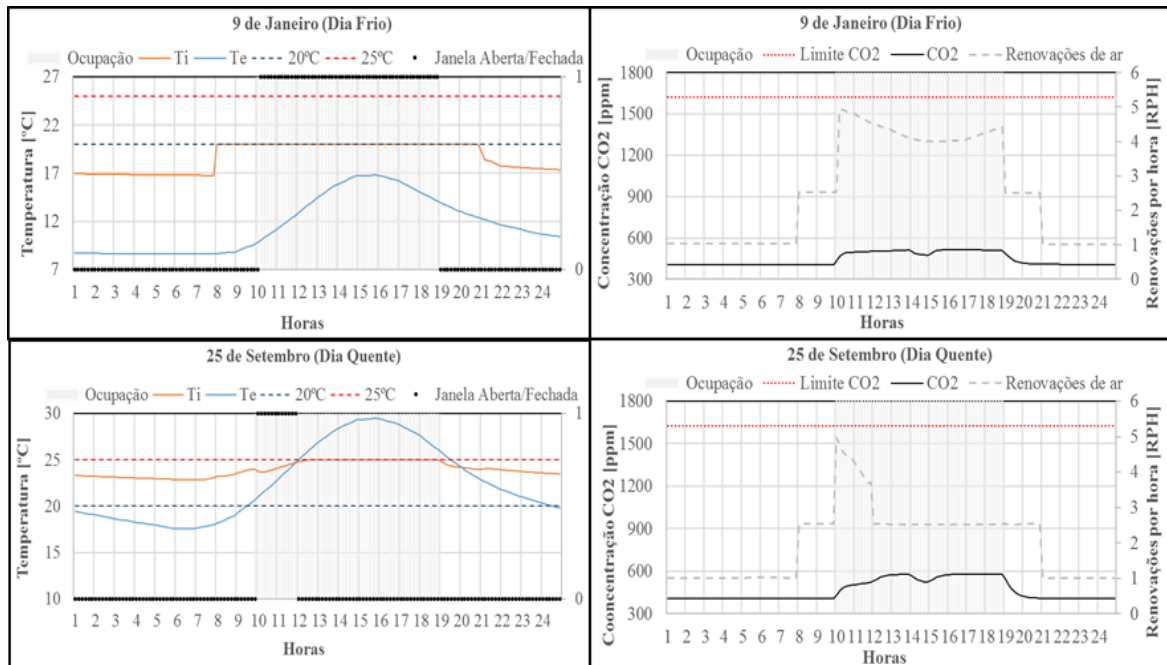


Figura 8.13 - Temperatura interior (esquerda), concentração de CO<sub>2</sub> (direita) para um dia frio e para um dia quente.

Na figura 8.14 encontram-se os gráficos da temperatura interior e do perfil do uso de ventilação natural para uma semana fria e para uma semana quente, do lado esquerdo, e os gráfico da concentração de CO<sub>2</sub>, do lado direito.

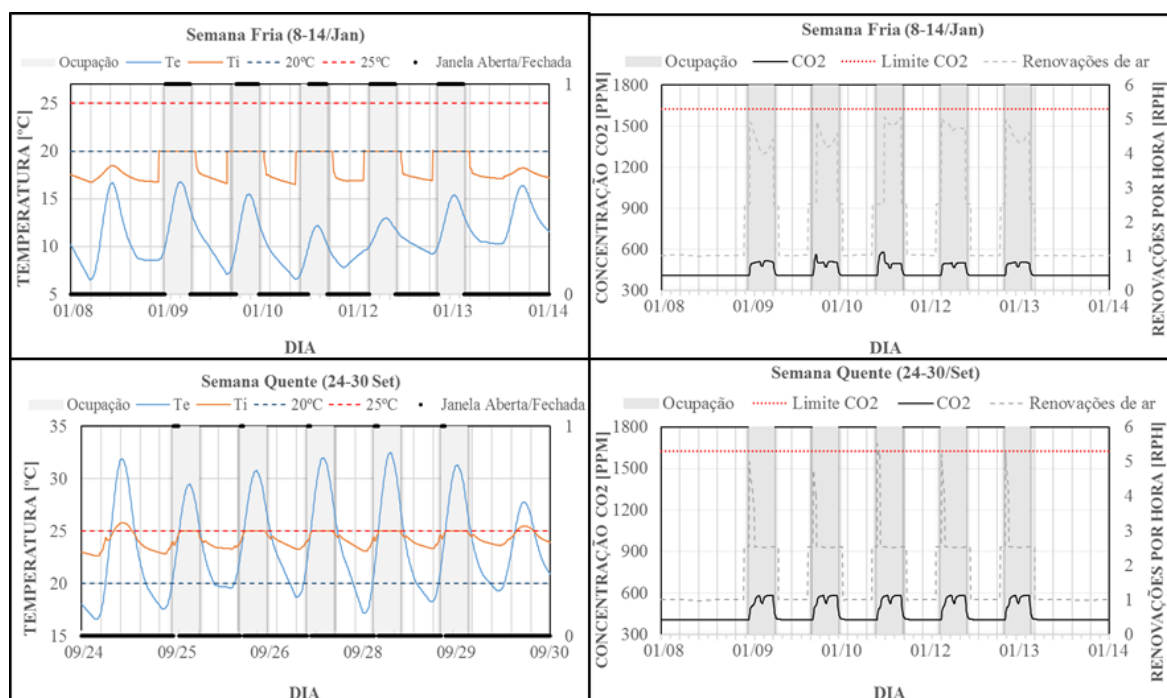


Figura 8.14 - Temperatura interior (esquerda), concentração de CO<sub>2</sub> (direita) para uma semana fria e para uma semana quente.

Neste segundo cenário o caudal de insuflação foi reduzido em 50%, ainda assim poderá haver ainda mais potencial de redução em espaços com esta tipologia. A temperatura interior encontra-se dentro do intervalo 20-25 °C tanto nos dias mais frios como nos dias mais quentes.

A concentração de CO<sub>2</sub> nas horas ocupadas está em níveis muito baixos (+/- 600 ppm) conferindo uma qualidade do ar muito boa para esta sala. Pode, contudo, representar alguns aspectos mal dimensionados como o grande caudal de insuflação e o excesso de uso de ventilação natural. Quanto ao caudal de insuflação deixa ainda uma boa margem de poupança, podendo este aproximar-se do ocorre nos gabinetes. A quantidade de horas que se mantém a janela aberta também pode ser reduzida, principalmente no inverno. Uma vez que nesta estação, a temperatura interior é cerca de 20 °C e existe boa qualidade do ar interior. Ao permitir a entrada de ar frio no espaço, o sistema é obrigado a uma carga de aquecimento maior e não traz benefícios significativos em termos de qualidade do ar. A opção de manter os set-points de abertura da janela manteve-se para haver um procedimento *standard* comum a todos os espaços, deixando aos ocupantes a possibilidade de decisão.

### Resumo dos resultados obtidos

Na figura 8.15 encontram-se os gráficos que comparam o cenário 1 e o cenário 2 em termos de temperatura interior, à esquerda e a concentração interior de CO<sub>2</sub>, à direita.

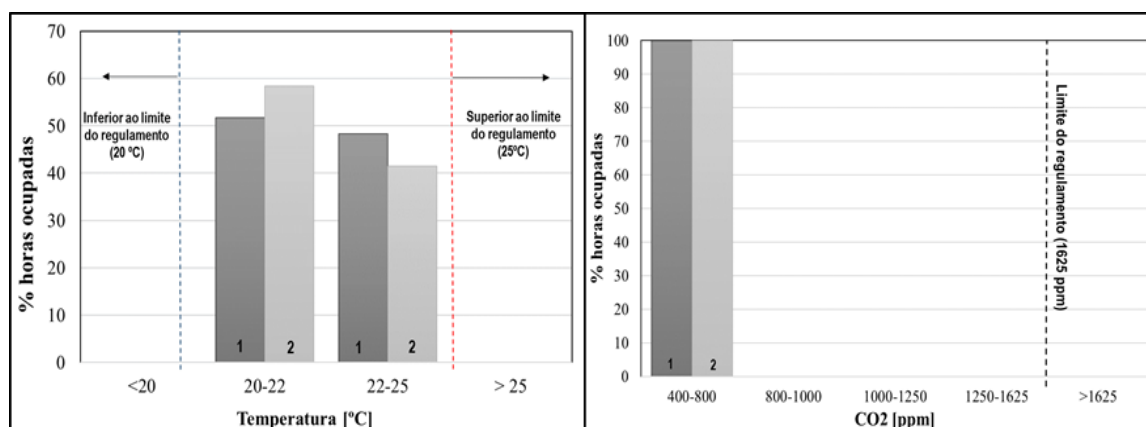


Figura 8.15 - Temperatura interior (esquerda) e concentração de CO<sub>2</sub> (direita) das horas ocupadas. Os valores encontram-se em percentagem de frequência das horas ocupadas que correspondem a cada nível de temperatura/concentração CO<sub>2</sub>.

Como esperado pela análise feita anteriormente, tanto a temperatura interior como a concentração de CO<sub>2</sub> estão dentro de limites impostos. A temperatura interior está bem distribuída entre os dois intervalos considerados (20-22°C e 22-25°C). A concentração de CO<sub>2</sub> não ultrapassa em momento algum os 800 ppm.

É de referir um grande semelhança entre os resultados do cenário 1 e do cenário 2. Isto acontece porque a insuflação de ar sobredimensionada é o fator dominante.



## 8.4. Gabinete

Por fim, são apresentados os resultados obtidos para o ultimo espaço analisado, os gabinetes. O gabinete tem um caudal de insuflação de projeto de 20 l/s o que representa 72 m<sup>3</sup>/h e tendo em conta o seu volume ,31,5m<sup>3</sup>, representa 2,2 renovações por hora. No cenário 2, visto a insuflação ser metade deste valor, também as RPH são metade, ou seja, 1,1.

### Cenário 1

Na figura 8.16 encontram-se os gráficos da temperatura interior e perfil de utilização de ventilação natural para um dia frio e para um dia quente, do lado esquerdo, e os gráfico da concentração de CO<sub>2</sub>, do lado direito.

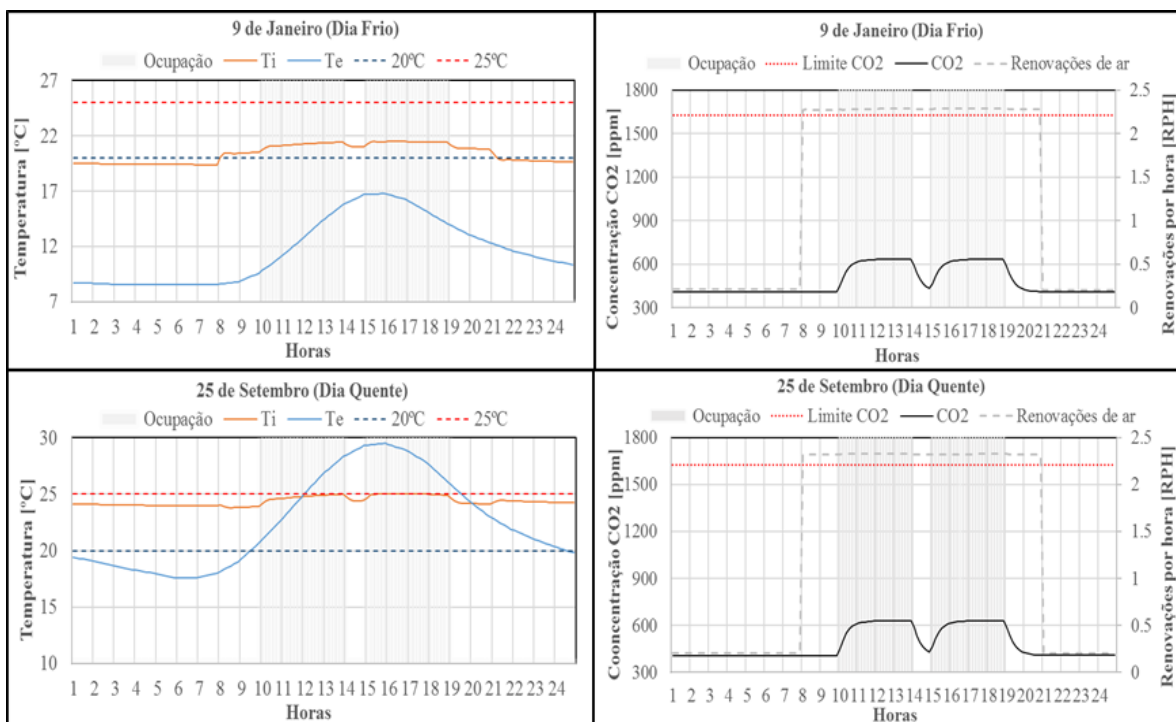


Figura 8.16 - Temperatura interior (esquerda), concentração de CO<sub>2</sub> (direita) para um dia frio e para um dia quente.

Na figura 8.17 encontram-se os gráficos da temperatura interior e do perfil do uso de ventilação natural para uma semana fria e para uma semana quente, do lado esquerdo, e os gráfico da concentração de CO<sub>2</sub>, do lado direito.

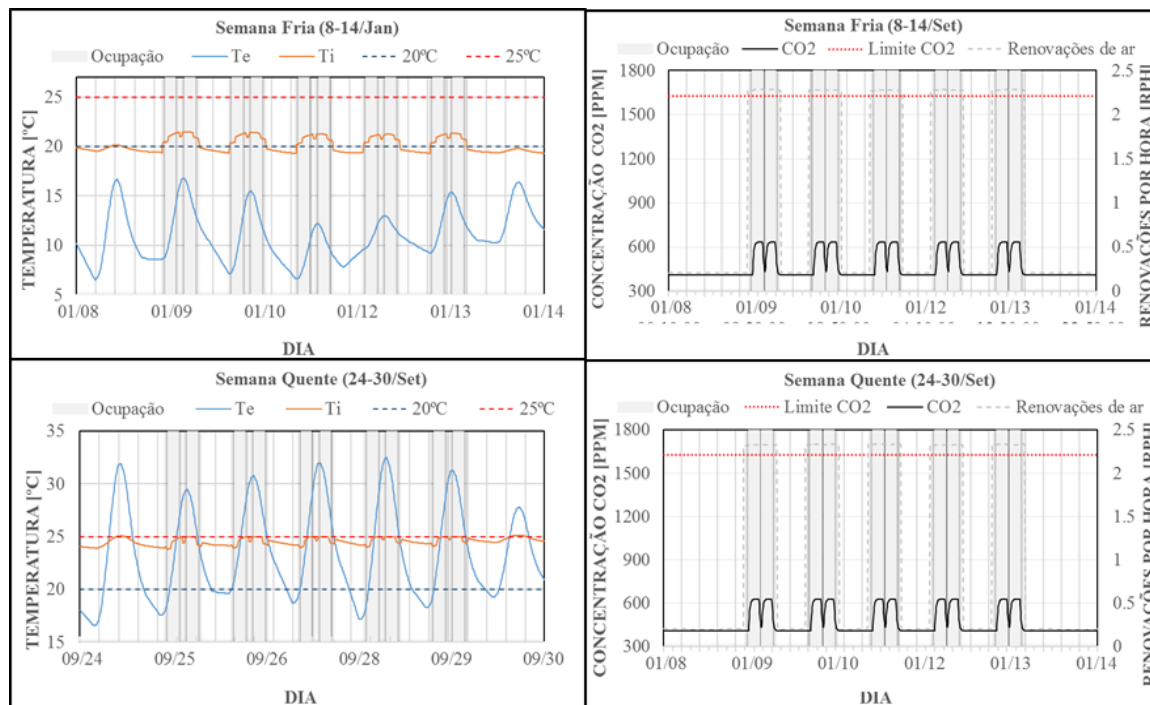


Figura 8.17 - Temperatura interior (esquerda), concentração de CO<sub>2</sub> (direita) para uma semana fria e para uma semana quente.

A temperatura interior durante os dias mais frios é aproximadamente 21°C, contrariamente aos escritórios que estão geralmente a 20°C. Este resultado poderá dever-se à reduzida área de um gabinete típico (12m<sup>2</sup>), que representa uma densidade de ocupantes por área superior à dos escritórios e consequentemente maiores ganhos internos por unidade de área. Outra justificação possível é a orientação a nascente do vão envidraçado que assim faz com que o gabinete receba mais radiação da parte da manhã, aquecendo e depois apenas mantém a temperatura ao longo do dia. Por fim, a insuflação de ar nestes espaços é bastante mais reduzida do que nos escritórios, sendo as renovações de ar por hora igualmente inferiores o que não confere a mesma dominância ao sistema AVAC.

A concentração de CO<sub>2</sub> nas horas ocupadas é cerca de 600 ppm. Este valor é semelhante ao verificado no escritório, o que representa um valor bastante positivo. As RPH são inferiores ao dos escritórios principalmente por se ter considerado 0.2 RPH em vez de 1 RPH para as restantes tipologias.



## Cenário 2

Na figura 8.18 encontram-se os gráficos da temperatura interior e perfil de utilização de ventilação natural para um dia frio e para um dia quente, do lado esquerdo, e os gráfico da concentração de CO<sub>2</sub>, do lado direito.

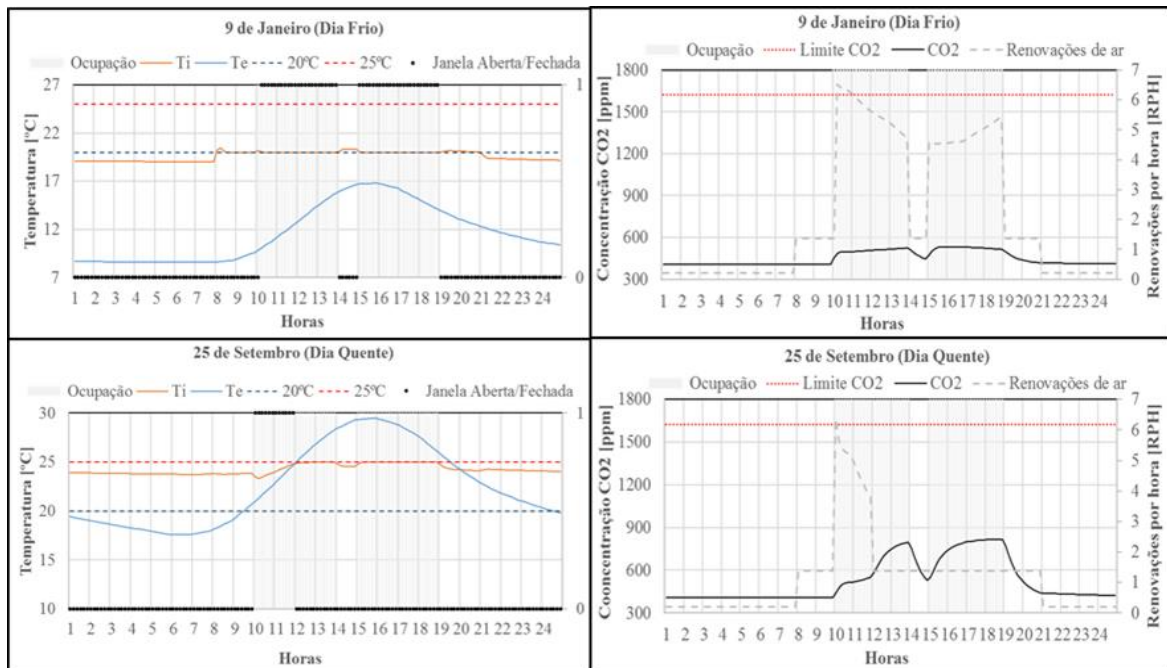


Figura 8.18 - Temperatura interior (esquerda), concentração de CO<sub>2</sub> (direita) para um dia frio e para um dia quente.

Na figura 8.19 encontram-se os gráficos da temperatura interior e do perfil do uso de ventilação natural para uma semana fria e para uma semana quente, do lado esquerdo, e os gráfico da concentração de CO<sub>2</sub>, do lado direito.

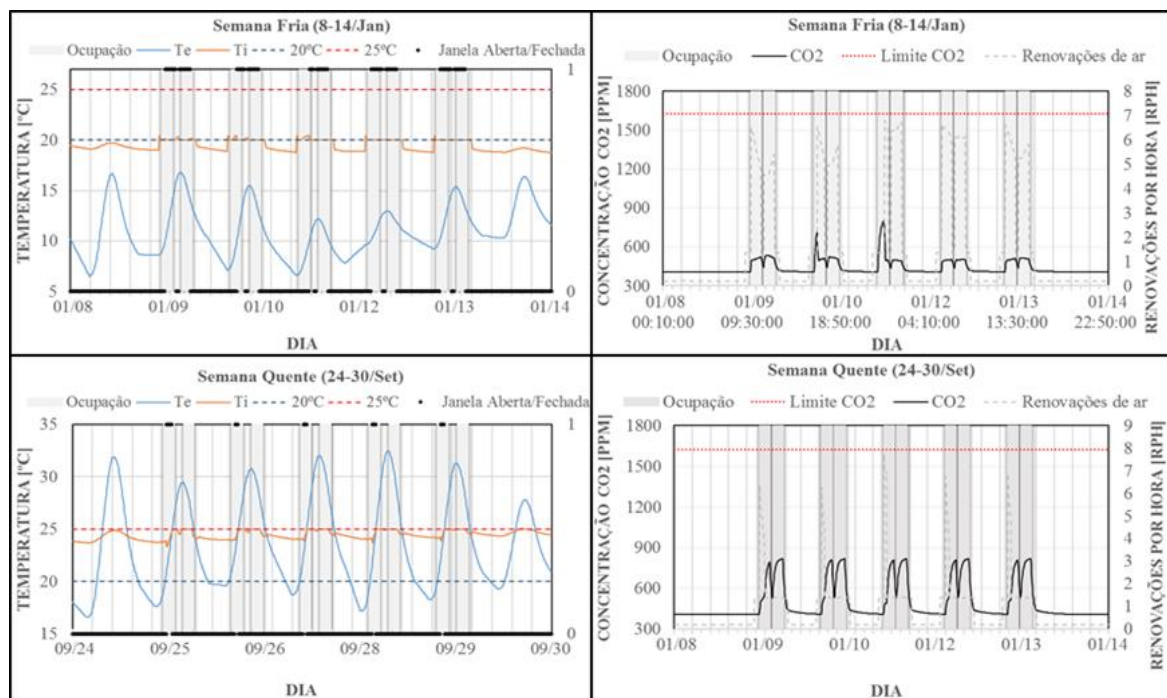


Figura 8.19 - Temperatura interior (esquerda), concentração de CO<sub>2</sub> (direita) para uma semana fria e para uma semana quente.

Nos dias mais frios a temperatura interior nas horas ocupadas é de aproximadamente 20 °C, 1°C abaixo do que se verificou no cenário 1. Este resultado é consequência da energia perdida para o exterior devido à ventilação natural. Mais uma vez, a ventilação natural pode ser evitada em algumas das horas sugeridas pois a temperatura interior situa-se à margem do limite permitido para edifícios com sistemas mecânicos e a concentração de CO<sub>2</sub> é baixa, não havendo nenhum benefício significativo. Manteve-se o critério, contudo a opção de abrir as janelas fica ao critério dos ocupantes. Nos dias mais quentes o comportamento térmico da sala é semelhante em ambos os cenários. A área de abertura da janela também não é obrigatoriamente total embora se tenha considerado esse apenas a abertura total para simplificação.

A concentração de CO<sub>2</sub> é relativamente maior neste cenário, resultado da redução da ventilação mecânica e da desaqueção do uso de ventilação natural em certos momentos.

### Resumo dos resultados obtidos

Na figura 8.20 encontram-se os gráficos que comparam o cenário 1 e o cenário 2 em termos de temperatura interior, à esquerda e a concentração interior de CO<sub>2</sub>, à direita.

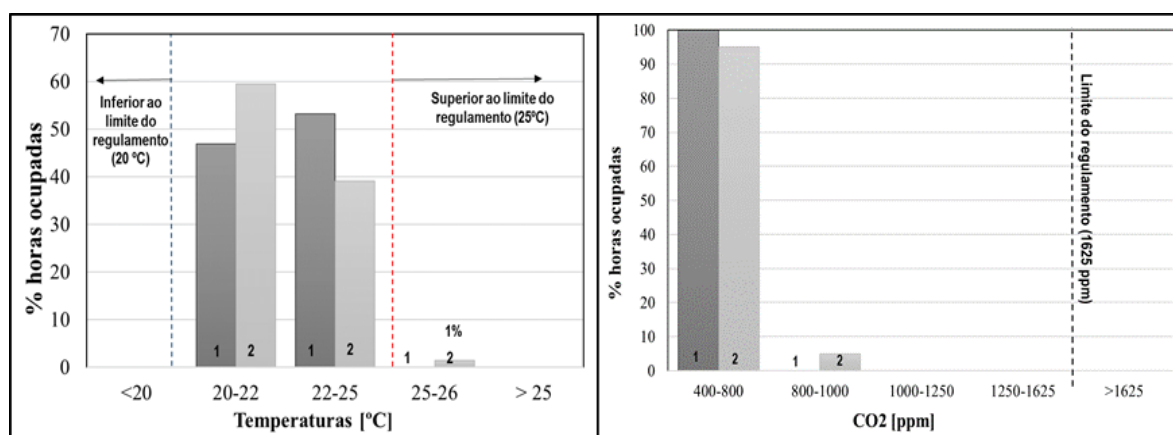


Figura 8.20 - Temperatura interior (esquerda) e concentração de CO<sub>2</sub> (direita) das horas ocupadas. Os valores encontram-se em percentagem de frequência das horas ocupadas que correspondem a cada nível de temperatura/concentração CO<sub>2</sub>.

A temperatura interior tem um comportamento relativamente semelhante em ambos os cenários. Há contudo 1% dos valores entre 25 e 26 °C no cenário 2. Estes valores são superiores ao limite do regulamento e devem-se à incapacidade do AVAC satisfazer as necessidades térmicas quando não há ventilação natural nas tardes de verão. Contudo, não é algo significativo devido à sua baixa frequência e por o limite ser ultrapassado em menos de 1°C.

Quanto à concentração de CO<sub>2</sub> os valores encontram-se maioritariamente entre 400 e 800 ppm, havendo apenas algumas exceções para o cenário 2.

## 8.5. Compilação de resultados

Este capítulo surge como modo de simplificação dos resultados apresentados nos capítulos anteriores. As tabelas 8.1 e 8.2 apresentam a compilação dos resultados obtidos da temperatura interior e da concentração de CO<sub>2</sub> para cada cenário de cada um dos espaços.

Tabela 8.1 - Frequência do intervalo de valores de temperatura interior em cada um dos espaços.

Zona	Cenário	Temperatura interior (%)				
		<20	20-22	22-25	25-26	> 26
Sala Pequena	1	0	29	66	6	0
	2	0	39	54	7	0
Sala Grande	1	0	12	88	0	0
	2	0	35	65	0	0
Escritório	1	0	52	48	0	0
	2	0	58	42	0	0
Gabinete	1	0	47	53	0	0
	2	0	60	39	1	0

A temperatura interior em todas as zonas estudadas encontra-se geralmente dentro dos limites de conforto discutidos anteriormente, ou seja, entre os 20°C e os 25°C. Existe apenas uma exceção nas salas pequenas que apresentam temperaturas interior até 26°C durante 6-7% das horas ocupadas. Grande parte destes valores constituem temperaturas na ordem dos 25,1/25,2°C e correspondem a um tempo de resposta dos sistemas face a um aumento dos ganhos internos no início das aulas. A discussão deste fenómeno foi discutida no capítulo 8.1. pelo que não deverá ser novamente argumentada. Também nos gabinetes existe 1% das horas ocupadas do cenário 2 onde a temperatura supera os 25°C, contudo, considerou-se desprezável por não representar uma parcela significativa. As salas de aula tendem a ser mais quentes do que os escritórios e os gabinetes verificando-se uma maior frequência da temperatura interior no intervalo 22 a 25 °C. Esta observação não é tão visível nas salas de aula pequenas pois foram simuladas com a fachada do vão envidraçado orientada a norte. Pode concluir-se que, em termos da temperatura interior, a ventilação natural mostrou-se uma opção bastante válida uma vez que o cenário 2 cumpre as condições de temperatura de forma semelhante ao cenário 2.

Tabela 8.2 - Frequência do intervalo de valores de concentração de CO<sub>2</sub> de cada um dos espaços.

Zona	Cenário	Concentração de CO <sub>2</sub> (%)				
		400-800	800-1000	1000-1250	1250-1625	>1625
Sala Pequena	1	6	8	59	0	0
	2	8	42	19	32	0
Sala Grande	1	1	53	47	0	0
	2	10	44	31	15	0
Escritório	1	100	0	0	0	0
	2	100	0	0	0	0
Gabinete	1	100	0	0	0	0
	2	95	5	0	0	0

As exigências de qualidade do ar interior são satisfeitas todas as horas do ano ocupadas e em todos as zonas estudadas. As salas de aula tendem a ter o ar mais poluído do que os restantes espaços porque as renovações de ar por hora não são proporcionais à diferença da taxa de ocupação destas em comparação com os escritórios e gabinetes. No entanto, apesar do cenário 2 apresentar resultados ligeiramente piores do que o cenário 1, pode considerar-se que a ventilação natural é novamente uma opção válida pois a concentração de CO<sub>2</sub> não atinge os 1625 ppm em momento algum.

## 8.6. Análise Económica

Neste capítulo são apresentados os resultados dos custos das intervenções e dos proveitos económicos que advêm das mesmas. Por fim será feito o balanço global onde será calculado o lucro anual e parâmetros económicos como o *payback*.

### 8.6.1. Poupança obtida por redução da fatura energética

Na tabela 8.3 são apresentadas comparações entre a eletricidade consumida quando o sistema AVAC funciona com o caudal de insuflação de projeto e quando este funciona a 50% do anterior.

Tabela 8.3 – Poupança elétrica e económica obtida para cada sala-tipo.

	Escritório		Sala Pequena		Sala Grande		Gabinete	
	Caudal Projeto	50% Caudal Projeto	Caudal Projeto	50% Caudal Projeto	Caudal Projeto	50% Caudal Projeto	Caudal Projeto	50% Caudal Projeto
<b>Aquecimento AVAC (kWh)</b>	2531	1266	1381	759	2302	1151	460	230
<b>Arrefecimento AVAC (kWh)</b>	582	291	320	160	529	265	107	54
<b>Radiadores (kWh)</b>	18	20	12	13	0	0	2	66
<b>Total (kWh)</b>	3131	1576	1713	932	2831	1416	569	350
<b>Custo da eletricidade (€/ano)</b>	423	213	231	126	382	191	77	47
<b>Poupança (€/ano)</b>	<b>210</b>		<b>105</b>		<b>191</b>		<b>30</b>	

A tabela anterior permite aferir para cada um dos espaços estudados, a eletricidade anual poupada e a consequente poupança monetária. Como seria de esperar, os espaços onde se verifica a maior poupança são os escritórios e as salas de aula grandes. Estes espaços são os que apresentam um maior caudal de insuflação de projeto, desse modo, a redução de 50 % representa uma redução superior em comparação com as zonas restantes. A volumetria das zonas e o número de ocupantes também pode ser um dos fatores que influencia a elevada carga de climatização. Os gabinetes são os espaços onde a redução do consumo de eletricidade e dos seus custos associados é menor, uma vez que é uma zona com pouca insuflação de ar e tipicamente pequena.

Na figura 8.21 encontra-se o número total das zonas intervencionadas em cada bloco do edifício.

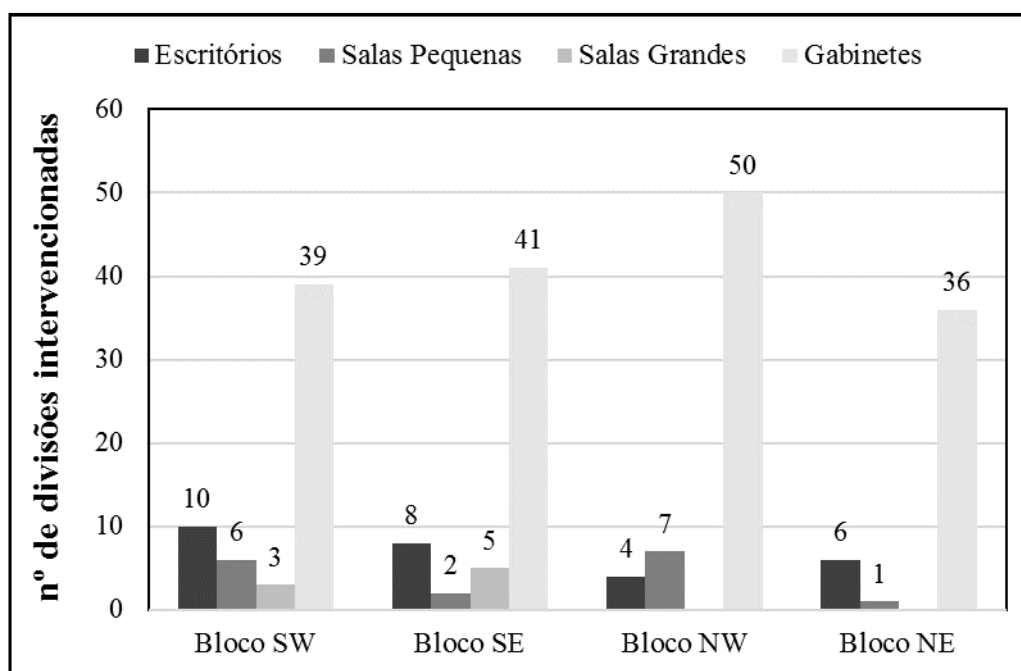


Figura 8.21 – Número de salas intervencionadas em cada bloco do edifício.

É possível calcular a poupança anual obtida por multiplicação da poupança individual de cada zona pelo número de salas intervencionadas. Na tabela 8.4 encontra-se representada a poupança alcançada pela totalidade dos espaços sujeitos às intervenções.

Tabela 8.4 – Poupança económica alcançada pelas medidas de eficiência energética discretizada para cada bloco do edifício e por tipo de sala.

Poupança (€)	Escritórios	Salas Pequenas	Salas Grandes	Gabinetes	TOTAL
SW	2099	632	573	1158	4462
SE	1679	211	955	1217	4062
NW	840	738	0	1484	3061
NE	1259	105	0	1069	2433
<b>Total</b>	<b>5877</b>	<b>1686</b>	<b>1528</b>	<b>4928</b>	<b>14019</b>

Os escritórios e gabinetes são os responsáveis pela maior poupança, no entanto, por motivos diferentes. Os escritórios são zonas definidas como laboratórios nos projetos de AVAC, sendo por isso divisões com muita ventilação mecânica deixando assim grande margem de redução. Já a elevada poupança representada pelos gabinetes deve-se ao elevado número de divisões intervencionadas (ver figura 8.21).

A tabela 8.5 resume a poupança anual alcançada por somatório da poupança energética dos ventiladores (tabela 6.4) e das cargas de climatização (tabela 8.4).

Tabela 8.5 – Poupança global alcançada por implementação das medidas de eficiência energética

<b>Poupança ventiladores (€/ano)</b>	<b>2562</b>
<b>Poupança carga de climatização (€/ano)</b>	<b>14019</b>
<b>Poupança Total (€/ano)</b>	<b>16581</b>

No total, as medidas de eficiência energética representam uma poupança na ordem dos 16,5 mil euros por ano.

### 8.6.2. Custos<sup>12</sup> de implementação das medidas de eficiência energética

Como referido anteriormente, as medidas de eficiência energética passarão essencialmente por uma intervenção às janelas do edifício e por aplicação de VV's.

O orçamento da intervenção às janelas da faculdade foi realizado pela empresa *C. Mestres Pintura* que se deslocou até às instalações da faculdade e onde realizou uma vistoria geral ao edifício C8, onde poderão avaliar o número de janelas a intervencionar e intervenção pretendida. Foram fornecidos diferentes orçamentos para diferentes intervenções às janelas (ver anexos IV, V, VI). A tabela 8.6 resume o custo de implementação de cada uma das hipóteses.

Tabela 8.6 – Custo de mudança de eixo e de instalação das janelas

<b>Custos Janelas (€)</b>		
<b>Mudança de eixo (216 Janelas)</b>	<b>Basculantes</b>	<b>1758</b>
	<b>Oscilobatente</b>	<b>8748</b>
<b>Janela de Raiz (6 Janelas)</b>	<b>Dupla basculante</b>	<b>3331</b>
	<b>Simples basculante</b>	<b>3183</b>
	<b>Dupla oscilobatente</b>	<b>3700</b>
	<b>Simples oscilobatente</b>	<b>3552</b>

Como referido anteriormente, na maioria das janelas (216) será apenas necessária uma mudança do eixo de abertura. Para a intervenção destas janelas foram sugeridas duas opções: abertura basculante e abertura oscilobatente. A opção com abertura basculante é a que serve os propósitos deste projeto e apresenta um custo de implementação muito mais baixo do que a abertura oscilobatente que necessita de muito mais investimento em materiais. Existem também seis salas com vidro fixo onde será necessário fazer uma janela de raiz. Neste caso foram fornecidas quatro opções: janela simples basculante, janela simples com kit oscilobatente, janela dupla basculante, janela dupla com kit oscilobatente. Uma vez que

<sup>12</sup> Todos os custos inseridos nesta secção já contêm o material, mão de obra e o IVA à taxa legal em vigor.

o vidro fixo presente nestas salas é vidro simples optou-se pela opção com janela simples e abertura basculante porque permite o aproveitamento de parte do vidro e caixilho existente.

Por fim, procurou-se orçamentar o custo da instalação dos VV's nos ventiladores das UTA's. Estes diferem consoante o ventilador utilizado. A tabela 8.7 contém as características dos ventiladores e o preço do respectivo VV.

Tabela 8.7 – Características dos ventiladores e custo de variadores de velocidade associados.

<b>Ventilador</b>	<b>UTA A</b>	<b>UTA B</b>	<b>UTA C</b>	<b>UTA D</b>
<b>Marca</b>	CIAT	CIAT	CIAT	CIAT
<b>Nº de Fabrico</b>	298E411 A1	298E411 B1	298E411 C2	298E411 D1
<b>Modelo</b>	Clima 200	Clima 150	Clima 300	Clima 250
<b>Voltagem (V)</b>	700	700	700	700
<b>Frequência (Hz)</b>	50	50	50	50
<b>Potência (kW)</b>	5.5	5.5	9.0	9.0
<b>Preço do VV<sup>13</sup> (€)</b>	2780	2780	3875	3875

Os valores são estimados (com base em catálogos da Schneider) e consideram variadores de frequência para motores assíncronos. Somando o preço dos quatro variadores, o custo total encontra-se na ordem dos 13 mil euros. A tabela 8.8 engloba todos os custos de investimento deste projeto.

Tabela 8.8 – Custo de investimento para aplicação das Medida de Racionalização de Consumo de Energia (MRCE)

<b>Custo Janelas basculante (€)</b>	1758
<b>Custo janela simples basculante (€)</b>	3183
<b>Custo Variadores de Velocidade (€)</b>	13309
<b>Custo de investimento total (€)</b>	18250

<sup>13</sup> Os valores incluem fornecimento, instalação, alteração de cablagem, carta de comunicação, acessórios de ligação e equipamento no QE respetivo. Os valores contêm ainda o IVA à taxa legal em vigor.



### 8.6.3. Período de retorno Simples do investimento

O período de retorno simples do investimento ou *payback* simples determina a viabilidade económica das medidas de eficiência energética. Este parâmetro representa o tempo decorrido entre investimento inicial e o momento em que o lucro líquido acumulado se iguala ao valor desse investimento. Este período de retorno do investimento avalia a situação a custos constantes e iguais aos do momento do investimento e não considera efeitos de inflação nem de taxas de juros, dado a incerteza da previsão dos parâmetros financeiros. Esse período de retorno simples (PRS) do sistema é dado pela razão entre o custo total de investimento e foi obtido de acordo com o *método de cálculo de período de retorno para medidas de eficiência energética* exposto no Anexo XIII do Decreto-Lei 79/2006 de 4 de abril (República, 2006):

$$PRS = \frac{C_i}{P_1} \quad (8.1)$$

Onde:

$C_i$  - Custo inicial do investimento (€);

$P_1$  - Poupança anual resultante da aplicação das MRCE.

Pela aplicação da equação 8.1, obteve-se um período de retorno de investimento, na ordem dos 1,1 anos, ou seja, cerca de um ano e um mês. Este período de retorno é bastante curto o que significa que a medida é altamente viável do ponto de visto económico.

## Referências Bibliográficas

- Engineering Tool Box. (s.d.). Obtido de [http://www.engineeringtoolbox.com/shr-sensible-heat-ratio-d\\_700.htm](http://www.engineeringtoolbox.com/shr-sensible-heat-ratio-d_700.htm)
- AAON. (2010). *Single-Zone VAV*.
- ADENE. (2012). *Guia da Eficiência Energética*. Obtido de [http://www.adene.pt/sites/default/files/guiaee\\_v1310.pdf](http://www.adene.pt/sites/default/files/guiaee_v1310.pdf)
- ADENE. (2016). *Sistemas de Ventilação*. Lisboa: ADENE - Agência para a Energia.
- Ahmed Abdeen Saleem, e. a. (2016). Achieving standard natural ventilation rate of dwellings in a hot-arid climate using solar chimney. *Energy and Buildings* 133, 360-370.
- AIGK. (19 de Junho de 2011). *Conclusões sobre Trocas de Calor*. Obtido de [http://fibioquimicat.blogspot.pt/2011\\_06\\_01\\_archive.html](http://fibioquimicat.blogspot.pt/2011_06_01_archive.html)
- Ales Podgornik, B. S. (2016). Effects of customized consumption feedback on energy efficient behaviour in low-income households. *Journal of Cleaner Production* 130, 25-34.
- Almeida, R. F. (2015). *Análise de Indicadores de desempenho energético para edifícios de serviços: aplicação ao campus ISCTE-IUL*. Lisboa.
- Arquitectos Associados, L. -E. (Junho de 1995). Projeto Arquitectura do edifício C8 FCUL da empresa GBMM. Campo Grande, Lisboa, Portugal.
- ASHRAE. (2003). *ASHRAE Standard – Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*. Atlanta: American Society of Heating Refrigeration, and Air - Conditioning Engineers.
- ASHRAE. (2005). *Handbook of fundamentals*. Atlanta, GA: American Society of Heating Refrigerating and Air Conditioning Engineers.
- ASHRAE. (2010). *ANSI/ASHRAE Standard 55*. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.
- AutoDesk - Sustainability WorkShop. (2015). *Wind*. Obtido de <http://sustainabilityworkshop.autodesk.com/buildings/wind>
- AutoDesk Sustainability Workshop. (2015). *"Radiant Heating and Cooling"*. Obtido de <http://sustainabilityworkshop.autodesk.com/buildings/radiant-heating-and-cooling>
- AutoDesk Sustainability Workshop. (2015). *Natural Ventilation*. Obtido de <http://sustainabilityworkshop.autodesk.com/buildings/natural-ventilation>
- AutoDesk Sustainability Workshop. (2015). *Wind*. Obtido de <http://sustainabilityworkshop.autodesk.com/buildings/wind>
- Behrang Chenari, J. D. (2016). Towards sustainable, energy-efficient and healthy ventilation strategies in buildings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 59, 1426-1447.
- Benya, J. R. (2001). *Lighting Design: Lighting for Schools*. National Clearinghouse for Educational Facilities.
- Berge, A. (2011). *Analysis of Methods to Calculate Air Infiltration for Use in Energy Calculations*. Göteborg, Sweden: Chalmers.
- Bourgeois, D. (2005). *PhD: Adding detailed occupancy prediction and advanced behavioural modelling in energy simulation*. Laval: Faculté des études supérieures, Université.

- C. A. P. Santos, J. L. (2006). *Coeficientes de transmissão térmica de elementos da envolvente dos edifícios, 1ª edição*. Lisboa: ICT informação técnica, edifícios- ITE 50.Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- Catálogo de Arquitetura. (2016). *Produtos - Catálogo de Arquitetura*. Obtido de <http://catalogodearquitetura.com.br/janela-de-abrir-e-tombar-em-pvc-squadra.html>
- EnergyPlus, U. D. (2010). *EnergyPlus Engineering Reference: The Reference to EnergyPlus Calculations*. US Dep. Energy.
- EnergyPlus™. (2013). *EnergyPlus Overview & Getting Started Tutorials*.
- ENERGYPLUS™. (2013). *Input/output reference: The encyclopedic reference to EnergyPlus input and output*. US Dep. Energy.
- European Commission. (Julho de 2013). *Consumption of energy - statistics explained*. Obtido de eurostat Statistics Explained: [http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Consumption\\_of\\_energy](http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Consumption_of_energy)
- Fonseca, P. G. (2015). *Avaliação do potencial solar e análise de medidas de eficiência energética num edifício universitário*. Lisboa.
- Frank Kreith, R. M. (2011). *Principles of Heat Transfer*, 7. Cengage Learning.
- Frank P. Incropera, T. L. (2011). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. John Wiley & Sons.
- G. Carrilho Da Graça, e. a. (2002). Simulation of wind-driven ventilative cooling systems for an apartment building in Beijing and Shanghai. *Energy and buildings* 34.1, 1-11.
- G. Evola, a. V. (2006). Computational analysis of wind driven natural ventilation in buildings. *Energy and buildings* 38.5, 491-501.
- Global Buildings Performance Network (GBPN). (2013). *Buildings for Our Future*. Paris.
- Google Earth. (2016). *Google Earth*. Obtido de <https://www.google.com/earth/>
- Höppe, P. (2002). Different aspects of assessing indoor and outdoor thermal comfort. *Energy and Buildings*, 34, Issue 6, 661-665.
- Intelligence, B. W. (2007). *The World Air Conditioning Market, The chinese air conditioning market*.
- J.F., N. (2001). Characterising occupant behaviour in buildings: towards a stochastic model of occupant use of windows, lights, blinds, heaters and fans. *Proceedings of the seventh international IBPSA conference*, 1073–1078.
- James A. Davis, D. W. (2010). Occupancy diversity factors for common university building types. *Energy and buildings* 42.9, 1543-1551.
- Jie Zhao, e. a. (2014). Occupant behavior and schedule modeling for building energy simulation through office appliance power consumption data mining. *Energy and Buildings*, 82, 341-355.
- José Galvão Teles, Engenheiros, Lda. (1995). Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Edifício C8 -Departamento de Química e Física, Sistemas de Climatização, Projeto de Execução. Campo Grande, Lisboa, Portugal.
- K. Al-Rashidi, D. L.-M. (2012). Impact of ventilation modes on carbon dioxide concentration levels in Kuwait classrooms. *Energy and Buildings*, 47, 540–549.
- K. Flodberg, Å. B.-C. (2012). Low-energy office buildings using existing technology: simulations with low internal heat gains. *Int. J. Energy Environ. Eng.*, vol. 3, no. 1, 19.

- LNEG - Laboratório Nacional de Energia e Geologia. (s.d.). *EnergyPlus - Ficheiro Climático Região Lisboa*. Obtido de [https://energyplus.net/weather-location/europe\\_wmo\\_region\\_6/PRT//PRT\\_Lisboa.085360\\_INETI](https://energyplus.net/weather-location/europe_wmo_region_6/PRT//PRT_Lisboa.085360_INETI)
- M. Krzaczek, J. F. (2015). Field investigations of stack ventilation in a residential building with multiple chimneys and tilted window in cold climate. *Energy and Buildings*, 103, 48-61.
- M. Krzaczek, J. F. (2015). Field investigations of stack ventilation in a residential building with multiple chimneys and tilted window in cold climate. *Energy and Buildings* 103, 48-61.
- Ma, Z. e. (2012). Existing building retrofits: Methodology and state-of-the-art. *Energy and Buildings*, 55, 889-902.
- Magoulès, H. Z. (2012). A review on the prediction of building energy consumption. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(6), 3586-3592.
- Mahmoud, A. H. (2011). An analysis of bioclimatic zones and implications for design of outdoor built environments in Egypt. *Building and Environment* 46.3, 605-620.
- Milorad Bojić, e. a. (2013). Performances of low temperature radiant heating systems. *Energy and buildings*, 61, 233-238.
- Ministérios do Ambiente, Ordenamento do Território e Energia e da Solidariedade, Emprego e Segurança Social. (2 de Dezembro de 2013). *Portaria n.º 349-D/2013*.
- Ministérios do Ambiente, Ordenamento do Território e Energia e da Solidariedade, Emprego e Segurança Social. (2013). *Portaria nº349-D/2013*.
- Ministérios do Ambiente, Ordenamento do Território e Energia e da Solidariedade, Emprego e Segurança Social. (4 de Dezembro de 2013). *Portaria n.º 353-A/2013*.
- Monteiro, V. (2007). *Manutenção de equipamentos e sistemas hoteleiros*. Lidel.
- Monteiro, V. (2016). *Ventilação na Restauração e Hotelaria*, 2. ETEP - Edições Técnicas e Profissionais.
- N. M. Mateus, A. P. (2014). Validation of EnergyPlus thermal simulation of a double skin naturally and mechanically ventilated test cell. *Energy and Buildings*, 75, 511-522.
- Nantka, P. L. (2009). Internal Heat Gains in Relation To the Dynamics of Buildings. *Architecture Civil Engineering Environment*, 1-6.
- Nicol JF, H. M. (2004). A Stochastic approach to thermal comfort-occupant behaviour and energy use in buildings. *ASHRAE Transactions*, 110(2), 554–568.
- Nuno M. Mateus, e. a. (2016). Comparison of measured and simulated performance of natural displacement ventilation systems for classrooms. *Energy and Buildings* 133, 185-196.
- OSRAM. (2016). *Ficha técnica de produto - L 38 W/840*. Obtido de [https://shop.w-f.ch/sonepar/asset\\_external/downloads/lieferanten/ledvance/datenbl%C3%A4tter/zmp\\_60444\\_1\\_38\\_w\\_840.pdf](https://shop.w-f.ch/sonepar/asset_external/downloads/lieferanten/ledvance/datenbl%C3%A4tter/zmp_60444_1_38_w_840.pdf)
- Parsons, B. W. (2002). Introduction to thermal comfort standards and to the proposed new version of EN ISO 7730. *Energy and buildings* 34.6, 537-548.
- Pérez-Lombard, e. a. (2008). A review on buildings energy consumption information. *Energy and Buildings*, 40, 394-398.
- Perino, M. (2008). *Integrating Environmentally Responsive Elements Buildings - State of the art review*, 2A. Marco Perino.

- Prashant Kumar, e. a. (2016). Real-time sensors for indoor air monitoring and challenges ahead in deploying them to urban buildings. *Science of the Total Environment* 560, 150-159.
- PROTOLAB. (2014). *TABELA DE CONDUTIVIDADE TÉRMICA DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO*. Obtido de <http://www.protolab.com.br/Tabela-Conductividade-Material-Construcao.htm>
- R. Ramponi, A. A. (2014). Energy saving potential of night ventilation: Sensitivity to pressure coefficients for different European climates. *Appl. Energy*, 123, 185–195.
- Refrigeration, C. A. (s.d.). *Refrigeration cycle explained in easy way*. Obtido de [http://www.central-air-conditioner-and-refrigeration.com/Refrigeration\\_Cycle.html](http://www.central-air-conditioner-and-refrigeration.com/Refrigeration_Cycle.html)
- Répubblica, D. d. (2006). *Decreto-Lei n.º 79/2006, de 4 de Abril. Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios (RSECE)*. Lisboa, Portugal: Diário da República N.º 67, I série-A, pp. 2416–2468.
- Rodrigues, A. M. (2009). *Térmica de edifícios*. Amadora: Edições Orion.
- Saúde, U. d. (2008). *Especificações Técnicas para Instalações de AVAC - ET06/2008*. Lisboa: Unidade de Instalações e Equipamentos and Administração Central do Sistema de Saúde.
- Saydaoui, S. (2010). *PRÁCTICAS DE LAS MÁQUINAS FRIGORÍFICAS*, Vol. 2. Marcombo.
- Sebastian Herkel, U. K. (2008). Towards a model of user behaviour regarding the manual control of windows in office buildings. *Building and environment* 43.4, 588-600.
- Sebastian Herkel, U. K. (2008). Towards a model of user behaviour regarding the manual control of windows in office buildings. *Building and environment*, 43.4, 588-600.
- Shenghua Zou, a. X. (2017). Simplified model for coefficient of performance calculation of surface water source heat pump. *Applied Thermal Engineering* 112, 201-207.
- Stathopoulos, T. (2006). Pedestrian level winds and outdoor human comfort. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Volume 94, Issue 11, 769-780 ISSN 0167-6105.
- Teixeira Duarte Engenharia e Construções, S.A., Fernando S. (1998). Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Edifício C8 - Departamento de Química e Física, Implantação de Equipamento AVAC, Circuitos Aeráulicos. Campo Grande, Lisboa, Portugal.
- The Freedonia Group, I. (2007). *World HVAC Equipment*.
- TRANE. (2013). *Understanding Single-Zone VAV Systems*. Engineers Newsletter. Obtido de [https://www.trane.com/content/dam/Trane/Commercial/global/products-systems/education-training/engineers-newsletters/airside-design/admapn047en\\_0413.pdf](https://www.trane.com/content/dam/Trane/Commercial/global/products-systems/education-training/engineers-newsletters/airside-design/admapn047en_0413.pdf)
- VELOCICALC®. (2016). *Operation and Service Manual: VELOCICALC® AIR VELOCITY METER MODEL 5725*. Obtido de [http://www.tsi.com/uploadedFiles/\\_Site\\_Root/Products/Literature/Manuals/1980566C-5725-VelociCalc.pdf](http://www.tsi.com/uploadedFiles/_Site_Root/Products/Literature/Manuals/1980566C-5725-VelociCalc.pdf)
- VELOCICALC®. (2016). *Operation and Service Manual: VELOCICALC® MULTI-FUNCTION VENTILATION METER MODEL 9565*. Obtido de [http://www.tsi.com/uploadedFiles/\\_Site\\_Root/Products/Literature/Spec\\_Sheets/9565-VelociCalc\\_A4\\_5001362-web.pdf](http://www.tsi.com/uploadedFiles/_Site_Root/Products/Literature/Spec_Sheets/9565-VelociCalc_A4_5001362-web.pdf)
- Warren PR, P. L. (1984). Window-opening behaviour in office buildings. *ASHRAE Transactions*, 90(1B), 1056–1076.
- X. Liu, Y. J. (2013). *Temperature and Humidity Independent Control (THIC) of Air-conditioning System*. 1º ed. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

- Yang Wang, F.-Y. Z.-H.-Q. (2014). Indoor air environment and night cooling energy efficiency of a southern German passive public school building operated by the heat recovery air conditioning unit. *Energy and Buildings*, 81, 9-17.
- Yi Jiang, D. A. (2003). Natural ventilation in buildings: measurement in a wind tunnel and numerical simulation with large-eddy simulation. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 91, Issue 3, 331-353.
- Young-hoon Kim, J.-w. H. (2015). Indoor Environment Control and Energy Saving Performance of a Hybrid Ventilation System for a Multi-residential Building. *6th International Building Physics Conference*, 2863-2868.
- Zhiqiang John Zhai, M.-H. J. (2011). Assessment of natural and hybrid ventilation models in whole-building energy simulations. *Energy and Buildings* 43.9, 2251-2261.

## Anexos

### Anexo I – Propriedades do vidro

#### Propriedades de materiais a utilizar nos casos a simular durante o curso

Isolantes	Espessura (m)	Condutividade (W/m-K)	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	Calor específico(J/kg-K)
Poliestireno expandido extrudido	0.02	0.03	49.0	1210.000
Fibra mineral	0.02	0.04	240.0	710.000
Carvalho	0.05	0.18	749.0	1630.000
Pinho	0.05	0.16	659.0	1630.000

Vidros	Vidro Incolor	Vidro Incolor	Vidro LoE
Espessura(m)	0.006	0.003	0.006
Transmissão solar, incidência normal	0.755	0.837	0.6
Reflectância Solar incidência normal, F	0.075	0.075	0.22
Reflectância Solar incidência normal	0.075	0.075	0.17
Transmissão visível, incidência normal	0.898	0.898	0.84
Reflexão visível, incidência normal, F	0.081	0.081	0.078
Reflexão visível, incidência normal, B	0.081	0.081	0.055

## Anexo II – Fatura da eletricidade da FCUL (Outubro 2015)

## Galp Power, S.A.

Atendimento comercial: 217 240 992  
 N.º Atendimento Operador Rede: EDP 800 506 506 (24h) (chamada gratuita)  
 Fax: 210 039 182  
 E-mail: power.comercial@galpennergia.com



FATURA  
Original

Fatura: FT 1050/97540 de 2015-10-22  
 ( 2015-09-18 a 2015-10-17 )

FACULDADE DE CIÊNCIAS  
 R. ERNESTO DE VASCONCELOS EDF. C5  
 FACULDADE DE CIÊNCIAS - CAMPO GRANDE  
 LISBOA  
 1749 015 LISBOA

Data Limite de Pagamento: 2015-12-31  
 Valor a Pagar: 57.789,40 (euros)

**Informação Geral**  
 ENDEREÇO DO FORNECIMENTO: R. ERNESTO DE VASCONCELOS S/N - LISBOA  
 CPE: PT00220000105170320HN  
 TITULAR: FACULDADE DE CIÊNCIAS  
 N.º FISCAL: 502619418 N.º CLIENTE: 612630651 N.º CONTRATO: 6162397  
 TARIFA / SERVIÇO FORNECIDO: MEDIA TENSÃO > 3.000MW/h  
 REF. DE COBRANÇA: 0.6462397.1-2015.10.17

Período de Faturamento		Descrição	Quantidade	Preço Unitário €	Taxa de Redução	Valor Bruto (incluindo IVA)	Valor Bruto (excluindo IVA)	IVA %	IVA €
Inicio	Fim								
2015-09-18	2015-10-17	Energia ativa vazio (medida)	93.048 kWh	0,05330	1	4.959,48	0,00	4.959,48	23
2015-09-18	2015-10-17	Energia ativa porta (medida)	54.929 kWh	0,06620	1	3.640,93	0,00	3.640,93	23
2015-09-18	2015-10-17	Energia ativa cheias (medida)	227.428 kWh	0,06160	1	14.009,56	0,00	14.009,56	23
2015-09-18	2015-10-17	Energia ativa super vazio (medida)	52.514 kWh	0,04730	1	2.483,91	0,00	2.483,91	23
2015-09-18	2015-10-17	ISP - Energia elétrica	427.989 kWh	0,00100	1	427,99	0,00	427,99	23
2015-09-18	2015-10-17	(T. Acesso) Potência Horas Ponta	873,00 kW	0,23370	30	6.120,60	0,00	6.120,60	23
2015-09-18	2015-10-17	(T. Acesso) Potência Contratada	1.594,95 kW	0,03120	30	1.492,87	0,00	1.492,87	23
2015-09-30	2015-10-17	(T. Acesso) Energia Ativa Porta - I, IV	31.166 kWh	0,04320	1	1.346,37	0,00	1.346,37	23
2015-09-18	2015-09-30	(T. Acesso) Energia Ativa Porta - II, III	23.833 kWh	0,04290	1	1.022,44	0,00	1.022,44	23
2015-09-30	2015-10-17	(T. Acesso) Energia Ativa Cheias - I, IV	126.876 kWh	0,03740	1	4.819,96	0,00	4.819,96	23
2015-09-18	2015-09-30	(T. Acesso) Energia Ativa Cheias - II, III	98.552 kWh	0,03710	1	3.656,28	0,00	3.656,28	23
2015-09-30	2015-10-17	(T. Acesso) Energia Ativa Vazio Normal - I, IV	52.727 kWh	0,02050	1	1.081,16	0,00	1.081,16	23
2015-09-18	2015-09-30	(T. Acesso) Energia Ativa Vazio Normal - II, III	40.321 kWh	0,02050	1	828,58	0,00	828,58	23
2015-09-30	2015-10-17	(T. Acesso) Energia Ativa Super Vazio - I, IV	29.758 kWh	0,01880	1	559,21	0,00	559,21	23
2015-09-18	2015-09-30	(T. Acesso) Energia Ativa Super Vazio - II, III	22.756 kWh	0,02000	1	455,12	0,00	455,12	23
2015-09-18	2015-10-17	(T. Acesso) Reativa Fornecida em Vazio	0 kWh	0,01970	1	0,00	0,00	0,00	23
2015-09-18	2015-10-17	(T. Acesso) React. Cons. em FV Escalão 1	5.001 kWh	0,00870	1	43,51	0,00	43,51	23
2015-09-18	2015-10-17	(T. Acesso) React. Cons. em FV Escalão 2	0 kWh	0,02830	1	0,00	0,00	0,00	23
2015-09-18	2015-10-17	(T. Acesso) React. Cons. em FV Escalão 3	0 kWh	0,07890	1	0,00	0,00	0,00	23
Contribuição audiovisual						2,85	0,00	2,85	6

Total sIVA 46.983,62  
 Total de IVA 10.805,78  
**Valor a Pagar 57.789,40**

Leitura / Consumo		Potência Contratada	Ciclo Horário	Data Início Contrato	Consumo a Faturar (kWh)
Potência Requerida	Potência Instalada				
0,00	0,00	1.594,95	Ciclo semanal com feriados	2014-01-27	Total Mensal 427.989,00

## Tarifas de acesso às redes

Valor independente do comercializador, sem IVA, incluído nos preços acima para o mesmo período de faturação 21.459,12€, o qual contém o valor de custos do interesse económico geral (CIEG), no valor de 10.944,19€.

Contacto do seu Gestor Comercial: Paulo Galina Tel. 918391062

Mensagem: (1) Taxa de IVA aplicável sobre o valor do seu pedido conforme legislação

A eletricidade faturada foi produzida a partir das seguintes fontes de energia: 26,7% hídrica; 15,7 eólica; 3,7% Cogeração renovável; 0,0% Geotermia; 2,4% Outras renováveis; 10,2% Cogeração Resid. 4,7% Gás natural; 28,1% Carvão; 7,7% Nuclear; 0,3% Fuelóleo; 2,4% RSU. Fonte Eise

SUSTENTABILIDADE: Um valor com futuro. Emissões de CO2: 139.952,40 Kg CO2

Documento também válido de reitor

uThC - Processado por programa certificado nº 2321/AT

Pagamento por: Transferência Bancária

IBAN: PT50 0010 0000 40253110001 65  
 Banco BPI, SA

Data Limite Pagamento: 2015-12-31

O não pagamento do documento na data de vencimento, implica a cobrança de juros à taxa legal em vigor.

FCUL ENT. 29/10/15 05283

Mac PPI GALP POWER



### Anexo III – Propriedades das luminárias

Field Name	Luminaire Configuration, Fluorescent Lighting				
	Suspended	Surface mount	Recessed	Luminous and louvered ceiling	Return-air ducted
Return Air Fraction	0.0	0.0	0.0	0.0	0.54
Fraction Radiant	0.42	0.72	0.37	0.37	0.18
Fraction Visible	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18
$f_{convected}$	0.40	0.10	0.45	0.45	0.10

## Anexo IV – Orçamento mudança de eixo de janela (basculante) e com kit oscilobatente

Orçamento para 216 Janelas Faculdade de Ciências de Lisboa
---------------------------------------------------------------

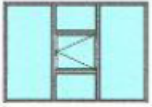
Janelas com kit basculante(abertura vertical)		
	Mão de obra p/janela €	Acessórios(iva incluído)€
	5	3.14
<b>sub-total</b>	1080	677.5
<b>total</b>		1757.5

Janelas com kit oscilo batente		
	Mão de obra p/janela €	Acessórios(iva incluído)€
	9	31.5
<b>sub-total</b>	1944	6801.4
<b>total</b>		8745.4

Responsável: José Costa

Data: 08/11/2016

## Anexo V<sup>14</sup> – Orçamento janela basculante com vidro simples

GRÁFICO	DESCRIÇÃO	Nº/UD.	PVP/UD	TOTAL
	Estrutura com vidro liso incolor 5mm da série SB em anodizado cor 0 composto por: -Fixo;Fixo;Janela batente de uma folha;Fixo;Fixo. Medida: 2600x2000	6	350.00	2100.00
Total Bruto (EU)				2100.00
23% IVA				483.00
Mao de Obra				600.00
Total Orçamento (EU)				3183.00

### OBSERVAÇÕES:

Fixação e químicos Wurth e Pecol

A construção e composição dos sistemas acima orçamentados estão em conformidade com os requisitos do fornecedor e da marcação CE

Poderá haver alterações no valor do orçamento se for necessária a intervenção de trabalhos de construção civil, rebocos, retoques e pinturas.


Este orçamento é válido por 30 dias após data de entrega

Responsável: José Costa

Data:10/11/2016

<sup>14</sup> Nota: No caso de haver preferência pela abertura oscilobatente, acresce o valor de 50 € (sem IVA) por janela ao valor bruto.

## Anexo VI<sup>15</sup> – Orçamento janela com vidro duplo

GRÁFICO	DESCRIÇÃO	Nº/UD.	PVP/UD	TOTAL
	Estrutura com vidro liso incolor 4mm+cx12+liso incolor 4mm da série SB em anodizado cor 0 composto por: -Fixo;Fixo;Janela batente de uma folha;Fixo;Fixo. Medida: 2600x2000	6	370.00	2220.00
Total Bruto (EU)				2220.00
23% IVA				510.60
Mao de Obra				600.00
Total Orçamento (EU)				3330.60

### OBSERVAÇÕES:

Fixação e químicos Wurth e Pecol

A construção e composição dos sistemas acima orçamentados estão em conformidade com os requisitos do fornecedor e da marcação CE

Poderá haver alterações no valor do orçamento se for necessária a intervenção de trabalhos de construção civil, rebocos, retoques e pinturas.

Este orçamento é válido por 30 dias após data de entrega

Responsável: José Costa

Data:10/11/2016

<sup>15</sup> Nota: No caso de haver preferência pela abertura oscilobatente, acresce o valor de 50 € (sem IVA) por janela ao valor bruto.